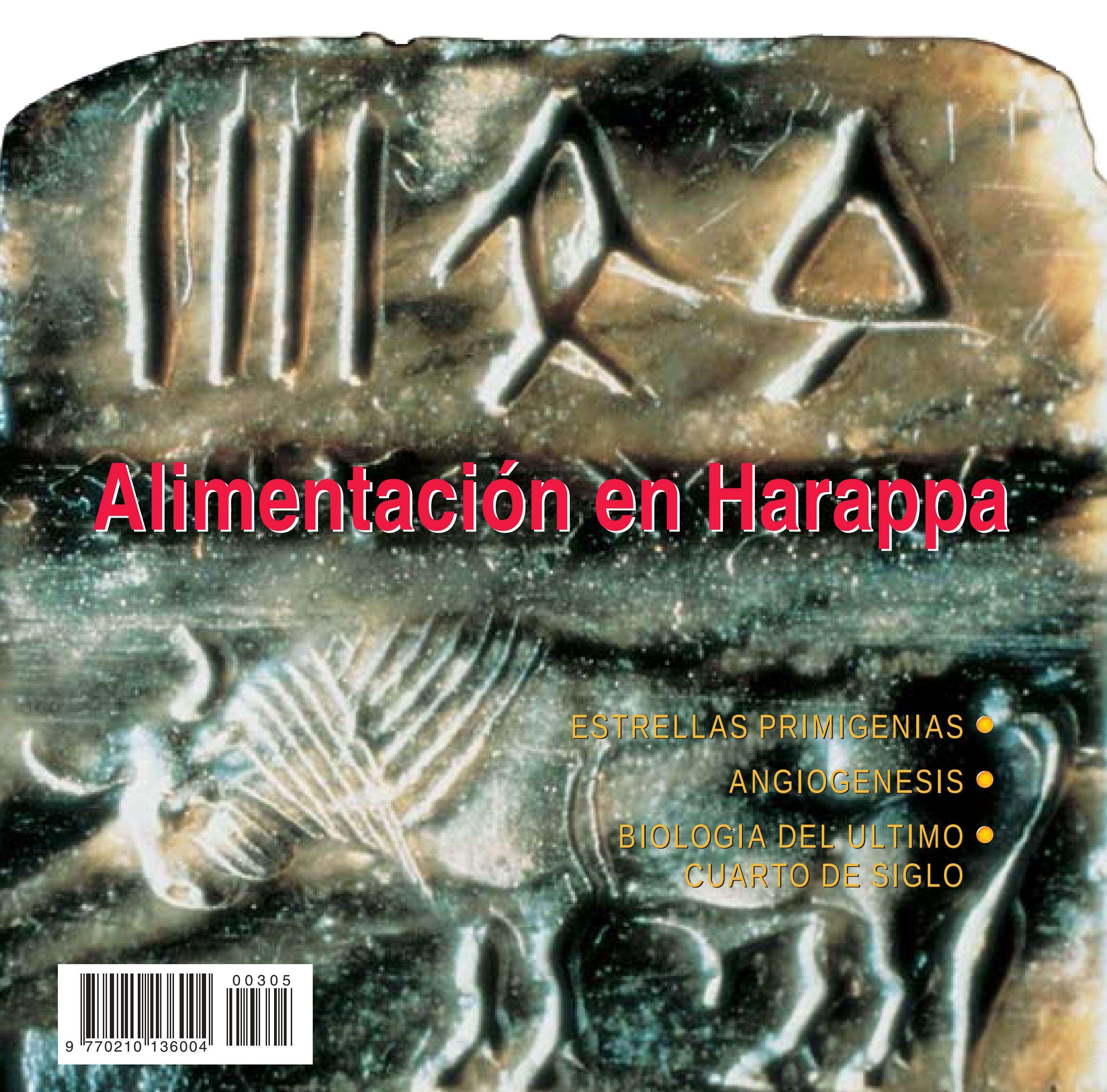
CRISTALES FOTONICOS • FITOCROMOS Y DESARROLLO VEGETAL

INVESTIGACION y CIENCIA

FEBRERO 2002
4,81 EURO 800 PTA.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



Alimentación en Harappa

ESTRELLAS PRIMIGENIAS •

ANGIOGENESIS •

BIOLOGIA DEL ULTIMO CUARTO DE SIGLO •

00305
9 770210 136004

INVESTIGACION y CIENCIA

Febrero de 2002 Número 305

SECCIONES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: G. Helmes, *Aachen*

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Hurd Studios
7	Keith Kasnot (*ilustración*); Michael Abbey (*folículo*); Simon Fraser (*cerebro*, *trombos en las piernas* y *cáncer de mama*); Salisbury District Hospital (*huesos fracturados*); P. Motta (*tejido adiposo*); Cecil H. Fox (*endometriosis*); Stanford Eye Clinic (*retina*); Spl/Photo Researchers, Inc.
9	CNRI *Phototake*
11	Edward Brown
12-13	Cortesía de Eli Yablonovitch
15	Cortesía de Blaze Photonics (*izquierda* y *centro*); Crystal Fibre a/s (*derecha*)
16	Paul Beard (*izquierda*); Helen Ghiradella, de *The Annals of the Entomological Society of America*, vol. 78, 1985 (*centro*); The Purcell Team *Corbis* (*derecha*)
17	Slim Films
20-29	Jaime F. Martínez García, Elena Monte y Francisco J. Ruiz Cantón
40	Aamir Qureshi *AFP Photo* (*Corbis*)
41	*AP Photo*; Terry C. Wallace, *Universidad de Arizona* (*inserto*)
42	B. K. Bangash *AP Photo* (*Khan*); Cortesía de Bhabha atomic Research Center (*Bhabha*)
43-47	Bryan Christie
48	Cortesía de Urenco Nederland
51-56	Don Dixon
59	*Nature*, vol. 171, pág. 737; 1953
60	J. Parkhill y B. W. Wren *et al.*
61	James King-Holmes *SPL*
62	David E. Coming y Tadashi Okada
63	Keith R. Porter, David M. Prescott y Jearl F. Frye, Univ. de Colorado
64	Scott Henderson y David Spector (*micrografía*); Tomo Narashima (*abajo*)
65	M. M. Perry y A. B. Gilbert (*a-d*); Lelio Orci (*e*)
66	Seong-Gi Kim y Kamil Ugurbil
67	C. Daiguet y C. Edelmann
69	Hans Pfletschinger
70-71	G. Helmes, Aachen
72	Jean Desse
73	Atelier Kühn
74	G. Helmes (*arriba*); Inst. Italiano per L'Africa e L'Oriente, Roma (*abajo*)
75	T. Gloerfelt-Tarp y P.J. Kailola (*Pomadasys* y *Arius*); Johnny Jensen (*Wallago*)
76-77	Corbis
78	Pour la Science
79	Bernard Gely, Obs. Côte d'Azur
80	LEGOS/CNRS/CNES
81	LEGOS/LGGE
82	LEGOS/CNRS/CNES
85	*FFSA Presse* ©J.-P. Surault (*arriba*); Bruno Vacaro (*abajo*)
86	Bruno Vacaro
90-91	Mark Schroeder
96	Sara Chen

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

José M.ª Valderas Martínez: *Angiogénesis terapéutica*; Ceferino López: *Cristales fotónicos*; J. Vilardell: *Poder nuclear de la India y Pakistán*, *Hace...*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; M.ª Rosa Zapatero: *Estrellas primigenias*; Francesc Asensi: *La pesca en la cultura de Harappa*; Manuel Puigcerver: *Los casquetes polares*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Aventuras problemáticas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	52,89 euro	96,16 euro
	8.800 pta.	16.000 pta.
Extranjero	78,70 euro	147,78 euro
	13.095 pta.	24.589 pta.

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 4,81 euro 800 pta.
Extraordinario: 6,01 euro 1.000 pta.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

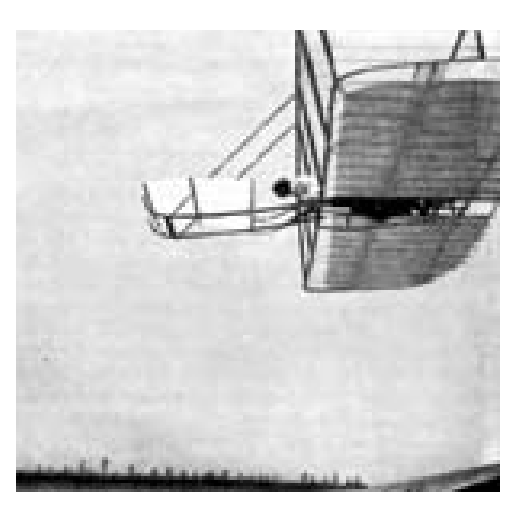
HACIA EL ESPACIO. «Mucho antes de que el primer habitante de la Tierra recale en la Luna, habrá otros hitos. Se está incluso tanteando en los bordes del espacio. En un reciente vuelo experimental, el Douglas Skyrocket, ingenio pilotado con un motor cohete, se elevó hasta una altura (se dice que 24.000 metros) donde más del 96 por ciento de la atmósfera terrestre se halla por debajo de los pies del piloto. En lo que respecta a la disponibilidad de oxígeno, el hombre cruza la frontera del espacio a unos 16.000 metros de altura. El piloto del Skyrocket rompió esa barrera. Para ello tuvo que ser encerrado en una indumentaria estanca dentro de la cabina, o sea, vestido con un traje espacial.»

EUGENESIA. «Podemos intentar suprimir los genes nocivos, no sólo controlando la reproducción sino, mejor aún, identificando y separando las células germinales deseables de las indeseables, que previsiblemente se hallan en todos los individuos. Podemos ver de mejorar la creación de variedades génicas por mutación artificial con radiaciones y sustancias químicas. Las mutaciones suelen ser a peor, pero bien podría acontecer que el futuro coloque en nuestras manos herramientas específicas con las que cambiar las variedades génicas menos deseables por otras más deseables. Los avances en esos campos de la biología probablemente irán por delante de nuestro pensar social y político.»

...cien años

STONEHENGE. «Los trabajos de volver a levantar el Gran Monolito de Stonehenge han permitido a los arqueólogos formarse un juicio más fiable sobre la época en que se erigieron esos monumentos druidas. Se desenterraron numerosos útiles de piedra neolíticos que muestran todos los signos de haberse empleado para cortar y escuadrar las piedras. Muestran todos señales de una labor dura. Actualmente, los expertos albergan pocas dudas de que Stonehenge fue construido en el Neolítico, pues de haberse construido en la Edad del Bronce o la del Hierro se habrían empleado herramientas de bronce o hierro. Suele admitirse que el bronce se introdujo en Britania hacia el 1500 a.C.»

WRIGHT. «El señor Wilbur Wright, de Dayton (Ohio), ha leído un trabajo de sumo interés ante la Sociedad de Ingenieros del Oeste, titulado ‘Algunos experimentos de Aeronáutica’. Proyectaron los señores Wilbur y Orville Wright planear desde cimas de cerros de arena. Parecía razonable que, si el cuerpo del operador pudiera colocarse en posición horizontal, y no derecho, como en las máquinas de Otto Lilienthal, Percy Pitcher y Octave Chanute, se reduciría sustancialmente la resistencia del viento. La nueva máquina de 1901 era de más de 28 metros cuadrados, un artilugio que, por su magnitud, se venía considerando imposible de controlar. En las costas de Carolina del Norte, planeando desde la cima de un cerro de arena, con el viento soplando a 20 kilómetros por hora, la máquina despegó y ejecutó un vuelo ondulante de 90 metros. A los espectadores el vuelo les pareció perfecto, pero el operador se había dado cuenta de que había necesitado toda la potencia del timón para que la máquina no se precipitase en el suelo ni se elevara tanto, que perdiese el ímpetu. Mostraron asimismo los experimentos que uno de los mayores peligros de las máquinas de colas horizontales había sido salvado por el uso de un timón frontal.» [*Nota de la redacción: la famosa máquina voladora de los hermanos Wright se hizo al aire el mes de diciembre de 1903.*]

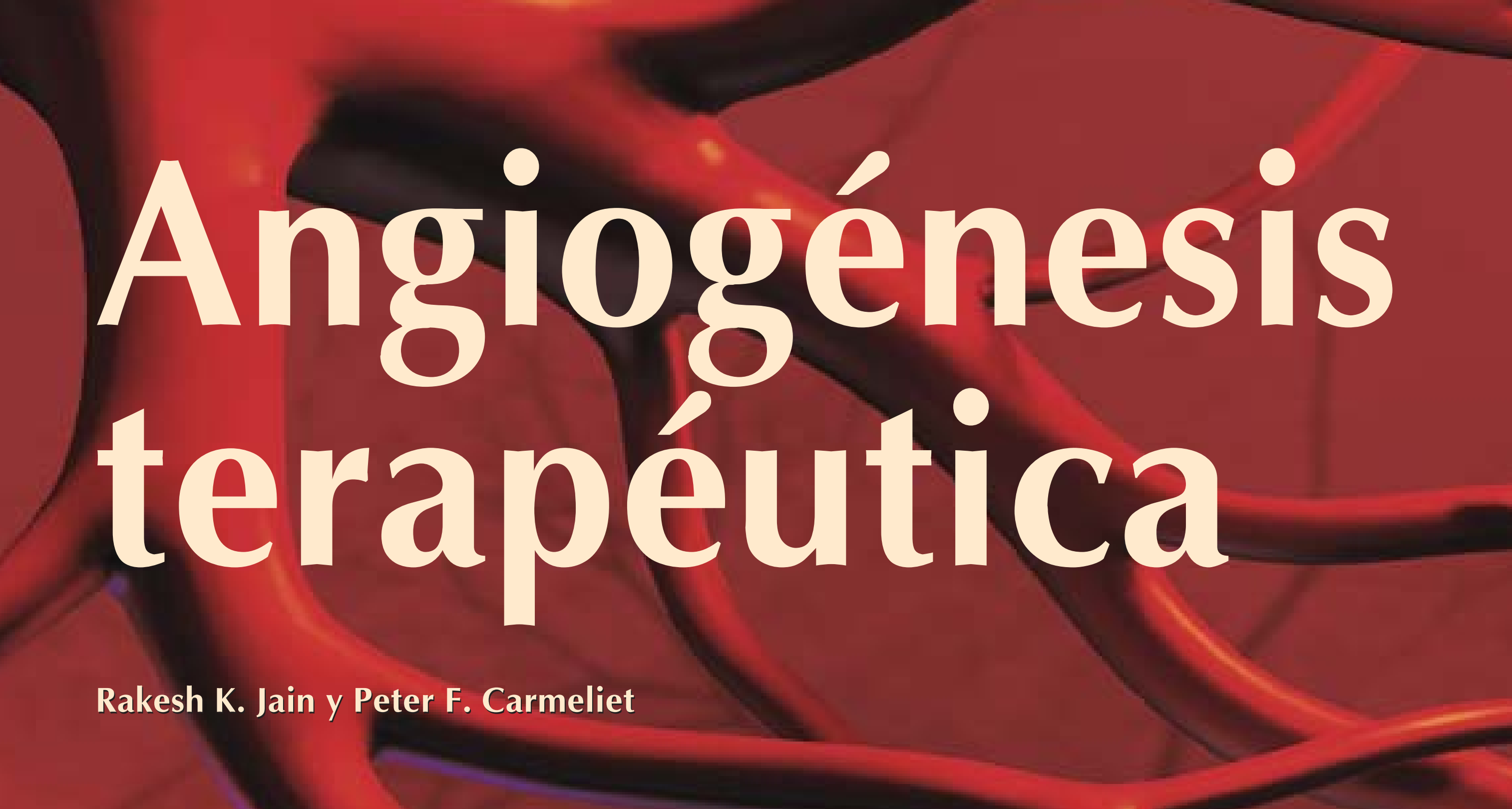


Planeador Wright, 1902

...ciento cincuenta años

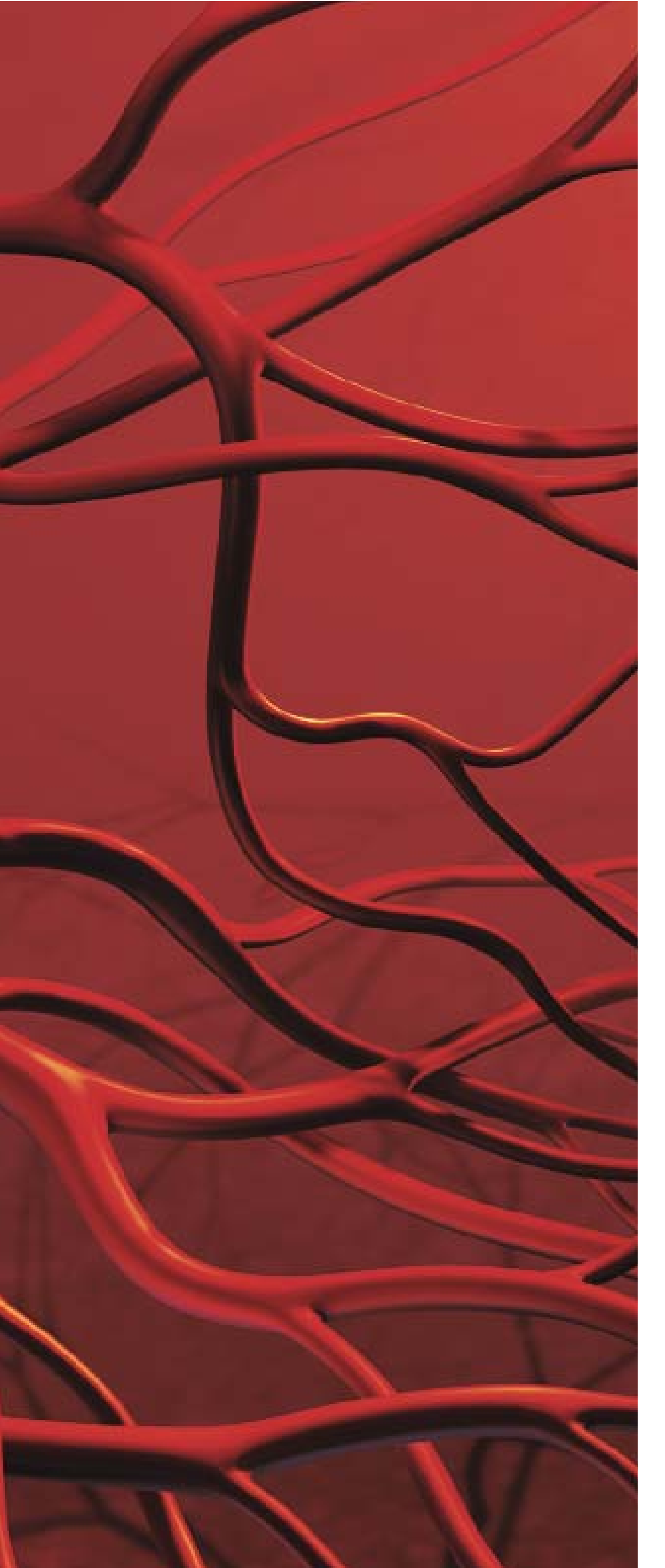
‘DISPARATES’ EVOLUTIVOS. «Los autores [anónimos] de *Vestigios de la Creación* han propagado la doctrina de que la vida es progresiva, o sea, que se elevó paso a paso desde estadios elementales. Incluso se sostiene que el hombre primario era un delfín, y dislates así. Esa clase de geólogos, como prueba fundamental de lo correcto de su teoría, afirmaron que entre las formaciones areniscas devónicas de Old-Red nunca se hallaron animales de inteligencia superior. Sin embargo, ante la Sociedad Geológica Británica, se ha demostrado que esa doctrina materialista es una falsedad amañada. Se leyó un trabajo acerca del descubrimiento en la arenisca amarilla cristalina de Old-Red, cerca de Elgin, norte de Escocia, de treinta y cuatro huellas de pisadas de tortuga, y en los mismos estratos, los restos del esqueleto de reptil fósil más antiguo hasta ahora descubierto. Ha sido designado *Telerpeton* (reptil muy viejo) *elginense*.»

Angiogénesis terapéutica



Rakesh K. Jain y Peter F. Carmeliet

Cuando sea posible regular la formación de vasos sanguíneos nuevos, o angiogénesis, se contará con un nuevo tipo de tratamiento del cáncer y de las enfermedades del corazón. Los ensayos en seres humanos con la primera generación de fármacos desarrollados para cumplir ese objetivo se encuentran en la última fase de experimentación



Serpentean por nuestro organismo, transportando la sangre que nos da la vida. Su curso es visible a través de nuestra piel como tenues caminos o delgados hilos azules. Sólo nos acordamos de ellos cuando nos hacemos un corte o nos acercamos a un hospital a donar sangre. Pero los vasos sanguíneos desempeñan funciones capitales en muchas enfermedades crónicas.

La proliferación de los capilares, vasos diminutos, está implicada en el crecimiento de ciertos tumores, cuya diseminación facilita. Contribuye también a la ceguera que pueden desarrollar los diabéticos. Y a la inversa, cuando merma la capacidad de fabricación de capilares, aparecen enfermedades, como en la muerte hística del músculo cardíaco por un infarto de miocardio. Por todo ello, diversos grupos de científicos, entre ellos los autores, trabajan para desentrañar los mecanismos que subyacen bajo el crecimiento anormal de los vasos. Cabe esperar que este empeño fructifique en forma de nuevos fármacos que bloqueen el crecimiento de los vasos o mejoren su función, en razón del efecto buscado.

El estudio del crecimiento de los pequeños vasos, el fenómeno de la angiogénesis, ha despertado un profundo interés en la comunidad científica y no en menor medida en la industria farmacéutica. Decenas de empresas investigan ahora mismo procedimientos terapéuticos relacionados con la angiogénesis. Se están probando en humanos alrededor de veinte compuestos que modifican la formación de nuevos vasos, en términos tanto de inhibición como de estimulación. En principio, tales fármacos podrían servir para tratar un amplio número de enfermedades, pero la curación del cáncer es el verdadero reto, motivo por el cual la mayoría de los que se investigan inhiben la angiogénesis. En ellos nos vamos a centrar en lo sucesivo.

En contra de lo que podría pensarse, en experimentos en animales se ha observado que los inhibidores del crecimiento de vasos pueden potenciar los efectos de los tratamientos tradicionales contra el cáncer (quimioterapia y radioterapia). Los estudios preliminares sugieren que estos agentes podrían administrarse en un futuro como medida preventiva para evitar que aparecieran tumores en las personas más susceptibles de desarrollarlos.

A principios del año 2001 se presentaron los resultados de los primeros estudios en humanos de varios fármacos que inhiben el crecimiento de nuevos vasos. Algunos científicos han quedado decepcionados porque sólo se ha observado mejoría en algunos de los enfermos con cáncer. Pero estas pruebas se diseñaron al objeto de determinar la seguridad de tales sustancias y su exención de efectos tóxicos, algo que sí ha quedado demostrado. Ya están en marcha estudios encaminados a comprobar su eficacia en humanos, que han de demostrar si los inhibidores de la angiogénesis responden a las expectativas creadas.

Angiogénesis

El término angiogénesis remite a la ramificación y extensión de los capilares existentes. La pared de estos capilares consta de una capa única de células endoteliales. La función fisiológica principal de la angiogénesis estriba en la reparación de tejidos dañados. Interviene también en la proliferación mensual de la pared del útero que precede a la menstruación y en el desarrollo de la placenta después de la fecundación. El desarrollo de los vasos sanguíneos está controlado por una serie de factores naturales en equilibrio. Los proangiogénicos estimulan la angiogénesis y los antiangiogénicos la inhiben. Así, el factor de crecimiento endotelial vascular pertenece a los primeros, mientras que la trombospondina inhibe la angiogénesis. Si se altera la regulación de este equilibrio, como ocurre durante el desarrollo de los tumores, los vasos se forman en el sitio equivocado en el peor momento.

Los oncólogos se interesaron por la angiogénesis en 1968, cuando aparecieron los primeros indicios de que los tumores podían segregar estas sustancias para estimular su progresión. Melvin Greenblatt y Phillipe Shubik, por un lado, y Robert L. Ehrmann y Mogens Knoth, por otro, observaron que los tumores en evolución liberaban una sustancia entonces no identificada que estimulaba en su interior el desarrollo de vasos sanguíneos. Semejante proliferación favorece el crecimiento tumoral porque asegura un aporte rico en sangre cargada con oxígeno y nutrientes. En 1971 Judah Folkman proponía bloquear este factor para combatir los tumores al limitar el suministro de nutrientes. Folkman defendería más tarde que así se podría también frenar la diseminación del cáncer, o metástasis, porque las células tumorales deben entrar en los vasos sanguíneos para iniciar su viaje a otras partes del organismo.

Los ensayos actuales con inhibidores de la angiogénesis contra el cáncer emplean estrategias diversas. La más importante se basa en la interacción con el factor de crecimiento endotelial vascular (FCEV). Esta molécula fue llamada en un comienzo factor de permeabilidad vascular por sus descubridores, el grupo encabezado por Harold F. Dvorak, de la Universidad de Harvard, en 1983. Se trata del factor proangiogénico más común identificado hasta la fecha. En 1989, Napoleone Ferrara y su equipo, de la empresa Genentech, identificaron el gen que la codifica y brindaron una nueva herramienta para entender mejor el funcionamiento del factor de crecimiento endotelial vascular. En 1996 los equipos de Ferrara y de uno de los autores (Carmeliet) demostraron, sin previo acuerdo, el papel crítico desempeñado por el factor de crecimiento endotelial vascular en la formación de nuevos vasos. Obtuvieron experimentalmente ratones que carecían de una de las dos copias del gen del factor de crecimiento endotelial vascular. Al fabricar sólo la mitad de la cantidad esperada de dicha proteína, morían en el útero, pues sólo disponían de vasos escasos y anormalmente organizados.

Se está considerando una amplia gama de posibilidades para neutralizar la actividad angiogénica de este factor en humanos. Se ensaya con anticuerpos, proteínas del sistema inmunitario, que se unan específicamente al factor de crecimiento y lo inactiven; formas solubles de los receptores celulares del factor que hagan de señuelo e impidan la unión del factor de crecimiento endotelial vascular antes que se una a las células; pequeñas moléculas que penetren en las células y bloqueen los mensajes que el factor de crecimiento envía al interior de las células endoteliales cuando ya se ha unido a los receptores en la superficie celular. Entre los compuestos en estudio citaremos los interferones, que rebajan la producción del factor de crecimiento endotelial vascular, y los inhibidores de metaloproteasas, que bloquean la liberación de este factor de su almacén en la matriz extracelular, esa entidad que mantiene a las células unidas para formar tejidos.

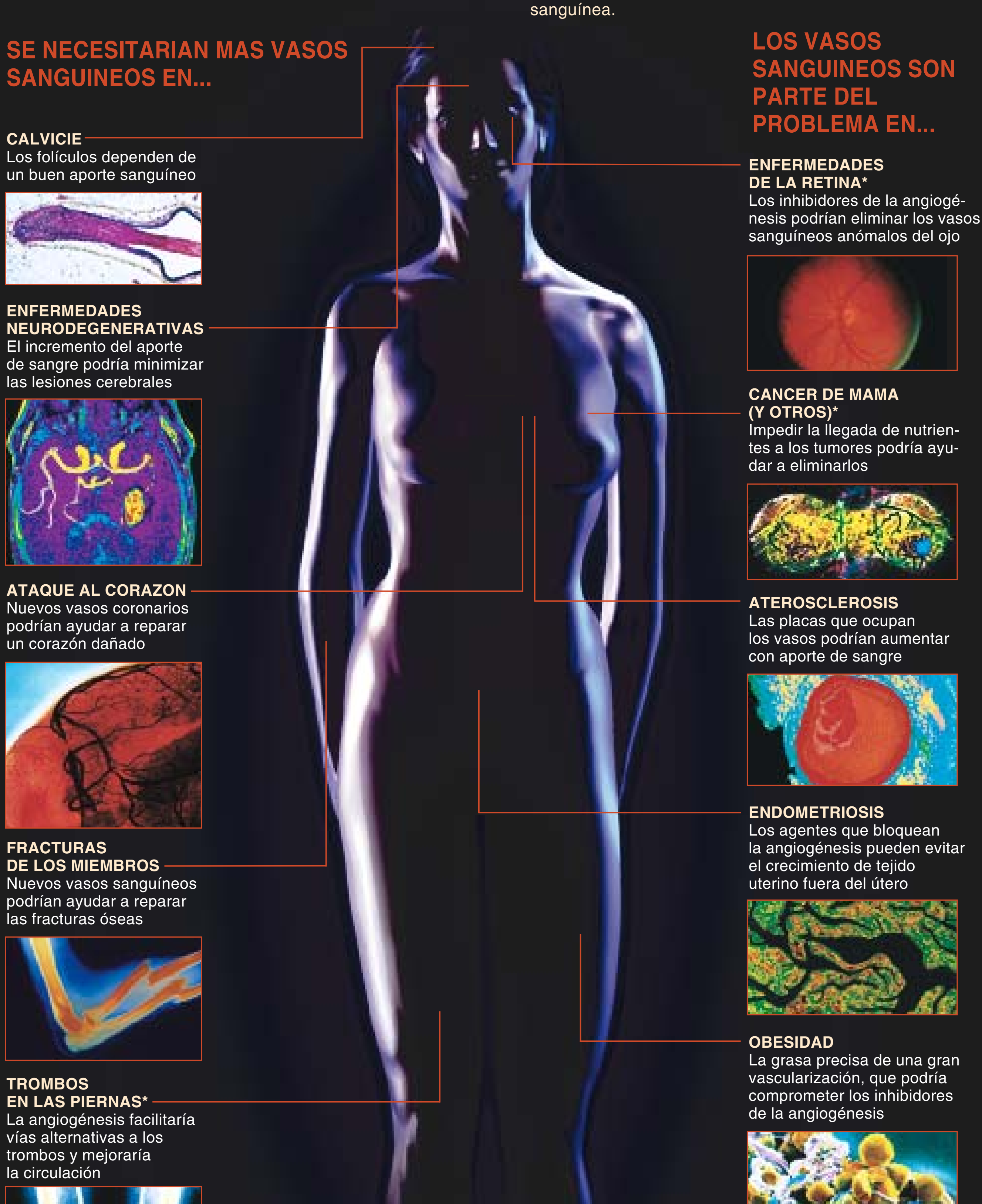
Aunque la reducción a la mitad de factor de crecimiento endotelial vascular resulta letal para los embriones de ratón, es probable que, para eliminar un cáncer en humanos, hubiera que inactivar toda la cuantía presente de dicha proteína, una tarea harto complicada. El factor es un agente poderoso; bastarían quizá cantidades mínimas para proteger de la muerte a las células endoteliales. Pero aunque fuera posible neutralizar del todo al factor de crecimiento endotelial vascular, el tumor podría recurrir a otros

Resumen/Angiogénesis

- En la actualidad se están realizando ensayos con más de veinte compuestos que modifican la angiogénesis, ya sea estimulando el desarrollo de nuevos vasos sanguíneos o bloqueándolo, en múltiples aplicaciones que incluyen desde el cáncer hasta el infarto de miocardio.
- Los inhibidores de la angiogénesis son, en general, más seguros y menos tóxicos que los fármacos empleados en quimioterapia, pero no es probable que se conviertan en un tratamiento exclusivo contra el cáncer. Los médicos habrán de diseñar planes de tratamiento que se combinen con cirugía, radioterapia y quimioterapia.
- Los vasos sanguíneos de los tumores suelen presentar anomalías. La angiogénesis parece subsanarlas antes de eliminar el tumor. Este efecto puede permitir que los agentes anticancerosos alcancen el tumor con eficacia mayor.

Las dos caras de la angiogénesis

La proliferación vascular es causa de diversas enfermedades (*derecha*) potencialmente susceptibles de tratamiento con inhibidores de la angiogénesis. Otras enfermedades (*izquierda*) podrían beneficiarse de agentes proangiogénicos para la estimulación del desarrollo de la vascularización sanguínea.



**Los ensayos en humanos con aplicaciones de modificadores de la angiogénesis para estas enfermedades están en curso.*

factores proangiogénicos, como el factor de crecimiento fibroblástico básico o la interleucina 8.

Para inhibir la angiogénesis en los pacientes afectos de cáncer existe también otro método, fundado en el incremento de la producción natural de factores antiangiogénicos. La idea le vino a Folkman tras enterarse de que Noel Bouck había identificado en 1989 un inhibidor natural, la trombospondina. Los cirujanos ya sabían que, al eliminar el tumor primario de un paciente, en algunos casos se aceleraba el crecimiento de otros tumores menores. Parecía como si el tumor primario secretara algo que mantuviera a éstos a raya. En la mayoría de los casos no se cuestiona la necesidad de extirpar el tumor, porque con frecuencia sucede que impide las funciones normales del tejido u órgano. Por otra parte, su permanencia en el interior del organismo es una fuente de nuevas metástasis de células cancerosas. Folkman consideró que el descubrimiento de un inhibidor natural de la angiogénesis abría la posibilidad de que las secreciones del tumor primario sirvieran para frenar el crecimiento lo mismo del tumor primario que de las pequeñas metástasis.

Con esta idea en mente, Folkman y su grupo hallaron dos moléculas más con capacidad antiangiogénica, en 1994 la angiostatina y tres años después la endostatina. Estos inhibidores han despertado enorme interés, en parte porque los estudios de Folkman demostraron que podían erradicar tumores en ratones.

Los ensayos clínicos con angiostatina y endostatina se encuentran aún en fases tempranas (experimentos con un pequeño número de pacientes que permitirán determinar la seguridad de su potencial empleo como fármacos). En el postrer congreso de la Sociedad Norteamericana de Oncología Clínica se presentaron los resultados preliminares ya comentados y que parecen confirmar la seguridad de la endostatina, sin que se hayan observado efectos secundarios. En los próximos años se publicarán los resultados de varios ensayos clínicos de estos y otros inhibidores de la angiogénesis.

Vasos sanguíneos ya formados

Los dos enfoques abordados se centran en la forma de impedir la aparición de nuevos vasos sanguíneos. ¿Qué hacer con los vasos sanguíneos ya constituidos en un tumor? ¿Sería posible atacarlos de una manera selectiva, sin afectar a los vasos de tejidos y órganos sanos (la llamada terapia vascular)?

Los autores

RAKESH K. JAIN y PETER F. CARMELIET aportan perfiles complementarios al estudio de la angiogénesis. Jain, profesor de la cátedra Andrew Werk Cook de biología tumoral en la facultad de medicina de Harvard y director del laboratorio Edwin L. Steele del Hospital General de Massachusetts, cursó la carrera de ingeniería química. Carmeliet enseña medicina en la Universidad Católica de Lovaina.

Para nuestra fortuna, los vasos que se forman en el interior de los tumores son anormales. Dilatados y estructuralmente desorganizados, son tortuosos y porosos. Pero no se acaban aquí sus diferencias. Las células componentes presentan en su superficie ciertas moléculas del tipo de las integrinas, que están ausentes, o son escasamente detectables, en los vasos maduros. Se acaba de lograr la síntesis de péptidos RGD, pequeñas proteínas que reconocen preferentemente las integrinas de los vasos tumorales. Tales péptidos pueden acoplarse a fármacos citotóxicos que porten a estos agentes terapéuticos directamente hasta los tumores sin lesionar otros tejidos. También podrían emplearse para obstruir los vasos que facilitan la nutrición del tumor, mediante su unión a moléculas que promueven la formación de trombos.

Pero podría no resultar tan sencillo que un fármaco anule a todos los vasos de un tumor. Cada una de las células que forman un mismo vaso tumoral pueden presentar variaciones importantes respecto a las otras. Los estudios realizados en el laboratorio de Jain, coautor del artículo, han demostrado que un 15 por ciento de las células de los vasos sanguíneos de los tumores malignos de colon presentan mosaicismo: unas exhiben determinadas proteínas en su superficie y otras no. Si las proteínas a las que se dirigen los nuevos fármacos difieren de un tumor a otro o incluso varían en un mismo tumor a lo largo de su desarrollo o durante el tratamiento, semejante heterogeneidad hará difícil encontrar tratamientos que actúen sobre los vasos sanguíneos y que sean autónomos.

Combinar

En un futuro próximo es probable que se continúen utilizando la cirugía y la radioterapia para erradicar el tumor primario. Hoy en día la quimioterapia se administra antes o después de tales medidas para reducir el tamaño del tumor y para eliminar las células malignas que no sean detectables. Podrían combinarse los fármacos antiangiogénicos con cualquiera de los otros tratamientos para mejorar la tasa de éxitos.

Ahondando en los estudios seminales de Beverly Teicher en Harvard en los años noventa, varios grupos han demostrado los beneficios de un tratamiento combinado. Folkman, Robert Kerbel y el equipo de Jain han observado ya que el tratamiento combinado puede producir remisiones duraderas en ratones.

Reviste particular interés advertir que la terapia antiangiogénica parece potenciar la eficacia de los tratamientos habituales contra el cáncer. La paradoja resulta, por un lado, de los agentes quimioterapéuticos, que dependen de la integridad de los vasos sanguíneos para alcanzar el tumor, y, por otro, de la radiación, que sólo elimina las células que reciben un aporte adecuado de oxígeno (al convertir el oxígeno en radicales libres citotóxicos). La lógica nos conduciría a pensar que, si se ponen trabas a la circulación del tumor, el tratamiento antiangiogénico debería reducir la eficacia de los tratamientos habitua-

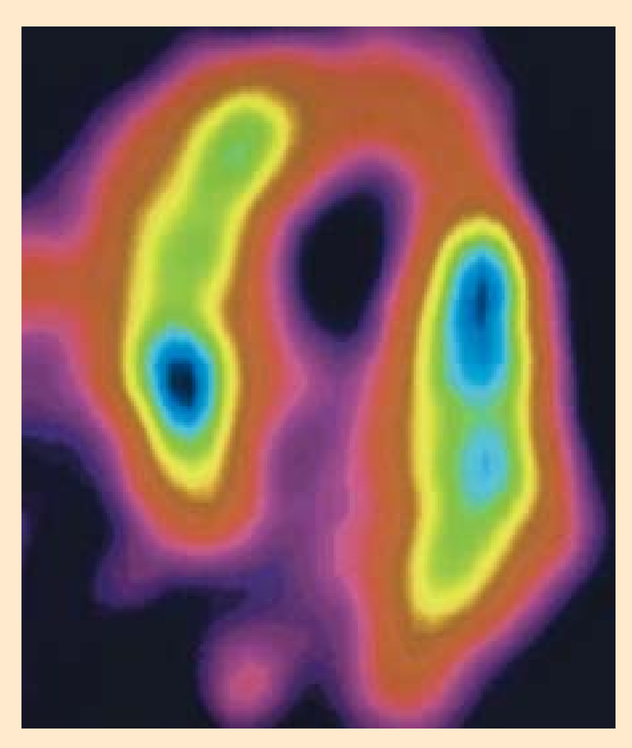
Angiogénesis terapéutica

La formación de nuevos vasos sanguíneos beneficia al organismo

Como se ha comentado, la inhibición de la formación de nuevos vasos sanguíneos puede ayudar a eliminar tumores. No obstante, también la estimulación de la proliferación vascular, o angiogénesis terapéutica, resulta muy útil en otras enfermedades.

Se está estudiando si las sustancias bloqueantes en el tratamiento del cáncer podrían aplicarse a pacientes con ataque al corazón o expuestos a sufrirlo. También podrían emplearse en los que presentan problemas vasculares de las extremidades.

Durante un infarto de miocardio, se forma un trombo en una de las arterias que surten de sangre al músculo cardíaco. De ese modo, una parte del tejido deja de recibir oxígeno y nutrientes, un fenómeno conocido como isquemia. A menos que el trombo se disuelva o emigre en seguida, esa parte del miocardio morirá. Además, muchos diabéticos presentan problemas circulatorios en las extremidades por oclusiones vasculares y en algunos casos es precisa la amputación.



ISQUEMIA MIOCARDICA (*áreas en azul y en verde*), falta de oxígeno que aparece en los ataques al corazón y que se podría tratar con los fármacos proangiogénicos que estimulan la formación de vasos sanguíneos.

La angiogénesis terapéutica puede consistir en la administración directa de una sustancia estimuladora de la proliferación vascular, como el factor de crecimiento endotelial vascular. Puede tener cabida también en terapia génica, que recurre a la administración de virus, células o fragmentos de ADN modificados genéticamente portadores del gen que codifica el factor de crecimiento endotelial vascular u otro factor angiogénico.

El tratamiento angiogénico con factor de crecimiento endotelial vascular o factor de crecimiento fibroblástico se ha venido estudiando a lo largo de los últimos diez años. En 1991, el equipo dirigido por Stephen H. Epstein, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, abordó los efectos del factor de crecimiento fibroblástico en los vasos sanguíneos de los animales. Un año más tarde, el grupo de Paul Friedmann, del Hospital Baystate de Springfield, observaba que la inyección del factor en conejos estimulaba la angiogénesis en las extremidades inferiores. A mediados del decenio de los noventa, varios equipos de investigadores, entre ellos los liderados por Epstein, Michael Simons, de la facultad de medicina de Harvard, Jeffrey M. Isner, del Hospital St. Elizabeth de Boston, y Ronald G. Cristal, de la facultad de medicina de la Universidad de Cornell, demostraron que los tratamientos basados en la administración de factores angiogénicos o de los genes que los codifican estimulaban la angiogénesis en el corazón y en las extremidades inferiores de animales.

Los ensayos clínicos destinados a evaluar la seguridad y eficacia de estos agentes están en curso. Carmeliet y otros también están investigando el potencial terapéutico de otras moléculas prometedoras, como el factor de crecimiento placentario, una molécula relacionada con el factor de crecimiento endotelial vascular. Pero la formación de vasos sanguíneos funcionales plantea todavía un desafío formidable. Los investigadores persiguen la mejor combinación de fármacos angiogénicos y su justa dosificación, posología y vía de administración. Se estudia si se puede incrementar la regeneración de los vasos sanguíneos mediante el trasplante de células madre endoteliales, células precursoras de las células endoteliales que forman los vasos sanguíneos. Estas células pueden aislarse en la médula ósea de los adultos.

Existen riesgos potenciales que acompañan al prometedor recurso a fármacos angiogénicos. Así, podría aumentar el riesgo de padecer cáncer al favorecer que los tumores muy pequeños que hubieran permanecido en estado latente desarrollaran su vascularización y crecieran. Además, como las placas ateroescleróticas que se forman en la enfermedad coronaria precisan un aporte propio de sangre, la angiogénesis terapéutica podría ejercer un efecto rebote al promover el crecimiento de las placas que son responsables del infarto.

Los estudios en humanos para comprobar todas estas hipótesis apenas han empezado. Esperamos que un día seamos capaces de utilizar pruebas genéticas para determinar el equilibrio natural de factores angiogénicos y antiangiogénicos en cada paciente, antes de iniciar un tratamiento modificador de la angiogénesis. Esta información también nos serviría para determinar si la isquemia miocárdica se debe a un defecto en la producción de factores proangiogénicos o a un exceso de inhibidores de la angiogénesis. Los resultados ayudarán al desarrollo de estrategias más directas de angiogénesis terapéutica.

les. Pero se ha demostrado que la administración de quimioterapia, así como de nutrientes y de oxígeno, mejora durante ciertos tratamientos antiangiogénicos.

De hecho, los investigadores liderados por Jain han revelado que los factores antiangiogénicos pueden, en cierta medida, normalizar la vascularización tumoral antes de atacarla. Parece que en un primer paso se eliminarían vasos redundantes e ineficientes, conservando intactos los eficientes. En ratones se ha observado que los inhibidores de la angiogénesis redujeron el diámetro de los vasos sanguíneos tumorales y los hicieron menos porosos; se asemejaban a los normales. Si estos estudios se reproducen en humanos, habría que ajustar la dosificación e identificar la posología apropiada.

Como sucede con muchos fármacos, es probable que las generaciones futuras de fármacos antiangiogénicos gocen de una eficacia mayor que la primera oleada. Para optimizar los futuros agentes, deberán modificarse los métodos de investigación. La mayoría de los estudios preclínicos, realizados antes de que el fármaco se ensaye en humanos, se efectúan sobre tumores artificiales provocados bajo la piel de ratones y otros animales de experimentación. Sin embargo, son pocos los tumores humanos que aparecen cerca de la piel. Para tener una idea más ajustada a la realidad del funcionamiento de un fármaco en pacientes, habrá que estudiar animales con tumores que aparezcan de forma espontánea en localizaciones más habituales.

Otra limitación de los estudios preclínicos radica en su carestía y carácter intensivo, por cuyo motivo los experimentos suelen darse por terminados cuando los tumores empiezan a remitir, pero antes de poder establecer de forma clara que el tratamiento sea realmente capaz de erradicar el cáncer. Puesto que los tumores pueden regenerarse a partir de un escasísimo número de células, los investigadores deberían seguir a los animales durante períodos más prolongados con el fin de tener expectativas más realistas de los candidatos a nuevos fármacos.

Aún más, los fármacos experimentales suelen administrarse antes de que los tumores estén plenamente asentados, un período en el que el cáncer es más vulnerable, sesgando la probabilidad de que el éxito se atribuya al fármaco. Los tumores en animales tienden a desarrollarse de forma más rápida que en los humanos y las sustancias que demuestran actividad contra tumores de crecimiento rápido pueden no resultar eficaces contra los tumores humanos, de crecimiento más lento.

Se impone abordar combinaciones de medicinas antiangiogénicas. Las células tumorales dominan el arte de la evasión, por lo que los investigadores deberán también estudiar combinaciones de fármacos antiangiogénicos. Cada tumor produce una combinación diferente de moléculas angiogénicas que puede modificarse, e incluso ampliarse, a medida que el tumor crece. Al administrar un fármaco antiangiogénico que bloquee determinada molécula, como el factor de crecimiento endotelial vascular, puede acontecer que el tumor recurra a otra sustancia proangiogénica para recabar aporte de sangre. En última instancia, el tratamiento antiangiogénico óptimo podría consistir en una combinación de varios inhibidores de la angiogénesis.

Prevención

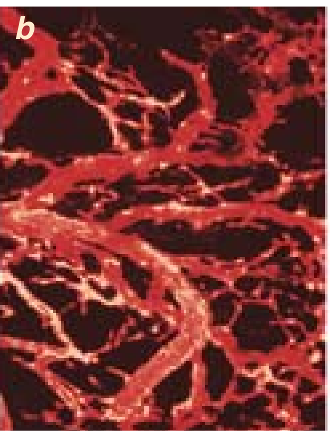
Si los inhibidores de la angiogénesis cumplen las expectativas creadas para el tratamiento del cáncer, es probable que se tengan que administrar durante largo tiempo a los pacientes. Los fármacos podrían indicarse, asimismo, para prevenir el cáncer en personas expuestas a un alto riesgo de un determinado tipo de tumor, una idea que ya formuló en 1976 Pietro M. Gullino. Por ello debe demostrarse su seguridad a largo plazo. (El interferón, un agente antiangiogénico indirecto, se ha administrado durante años a niños con hemangiomas, tumores benignos de los vasos sanguíneos, sin que se hayan observado efectos secundarios.) Los actuales ensayos clínicos en humanos no podrán contestar esta pregunta, porque se han diseñado para evaluar la seguridad a corto plazo, escasos meses. Los estudios en animales sugieren que algunos compuestos tal vez no sean suficientemente seguros en administraciones a largo plazo, tal como sería deseable en la prevención del

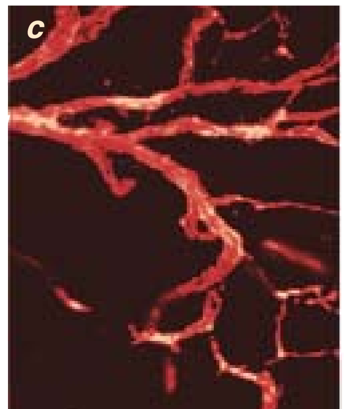
INHIBIDORES DE LA ANGIOGENESIS EN AVANZADO ESTADO DE EVALUACION

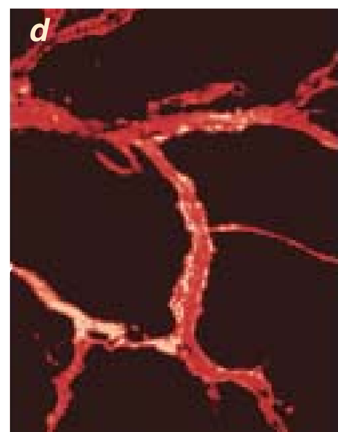
Fármacos potenciales del tratamiento del cáncer en la fase III de evaluación, la última antes de que la Agencia norteamericana de Alimentación y Farmacología considere su aprobación. La angiostatina y la endostatina se hallan en etapas menos avanzadas. Otros compuestos parecidos se están estudiando como tratamiento de la degeneración macular.

PRODUCTO	LABORATORIO	DESCRIPCION	ENFERMEDAD
Avastatina	Genentech	Anticuerpo monoclonal que bloquea el factor de crecimiento endotelial vascular, un promotor de la angiogénesis	Cáncer de mama y de colon
BMS275291	Bristol-Myers Squibb	Compuesto sintético polivalente	Cáncer de pulmón no microcítico
Interferón alfa	Roche, Schering	Proteína que inhibe la liberación de factores de crecimiento como el endotelial vascular	Diversos tumores
Marimastat	British Biotech	Compuesto sintético polivalente	Cáncer de mama y de próstata
Neovastat	Aeterna	Inhibidor natural con diversas propiedades	Cáncer de pulmón no microcítico y cáncer de riñón
SU5416	Sugen	Compuesto sintético que bloquea el receptor del factor de crecimiento endotelial vascular	Cáncer colorrectal
Talidomida	Celgene	Molécula orgánica cuyo mecanismo de acción se desconoce	Cáncer de riñón y mieloma múltiple









EN LOS VASOS SANGUINEOS se observan dos tipos de cambios en respuesta al tratamiento antiangiogénico. Los vasos normales (*a*), bien organizados, presentan diámetros regulares. Aparecen tortuosos y dilatados los de un cáncer de colon (*b*). Los inhibidores de la angiogénesis eliminan los vasos redundantes e ineficientes (*c*), lo que inicialmente normaliza la vascularización y facilita el acceso de los fármacos quimioterapéuticos hasta el tumor. Pese a ello, va creciendo el número de vasos que mueren (*d*).

cáncer o de su recidiva. Los ratones sometidos a manipulación genética para reducir la producción de factor de crecimiento endotelial vascular desarrollan alteraciones neurológicas tras períodos prolongados; lo han demostrado los experimentos de Carmeliet.

Una angiogénesis insuficiente empeora la capacidad de recuperación del corazón en la isquemia, falta de perfusión de los tejidos secundaria a un aporte de sangre insuficiente. Durante un ataque al corazón, se forma un trombo en una arteria responsable del aporte sanguíneo del músculo cardíaco, produciendo la muerte hística de una parte del órgano. Se están ensayando ya agentes que estimulen la angiogénesis, como tratamiento de la enfermedad isquémica coronaria. Por eso la terapia antiangiogénica podría incrementar el riesgo de desarrollar enfermedad isquémica coronaria. En consecuencia, como en cualquier otro tratamiento, los pacientes y los médicos deberán sopesar beneficios y riesgos en la aplicación de inhibidores de la angiogénesis.

La comprensión de los fenómenos asociados a la angiogénesis ha modificado nuestras nociones sobre el tratamiento del cáncer. El habitual recurso a la quimioterapia o la radioterapia, o a su combinación, detiene la progresión de muchos tumores, pero con excesiva frecuencia los tratamientos existentes sólo proporcionan un período asintomático antes de que el tumor vuelva a dar señales de actividad, se disemine y acabe con la vida del paciente. Parte del problema radica en la carencia de pruebas fiables, sensibles, baratas y fáciles de utilizar que permitan identificar características tumorales que nos orienten sobre la mejor opción terapéutica. El análisis de las características genéticas del tumor y del paciente puede mejorar la precisión del diagnóstico, así como la eficacia y seguridad de los tratamientos en un futuro. De aquí a 10 o 20 años, resultará de valiosa ayuda la representación visual de las anomalías vasculares estructurales y funcionales de los tumores.

Los enfoques antiangiogénicos han demostrado ya su beneficio en pacientes con hemangiomas. A medida que avance el conocimiento sobre la angiogénesis tumoral, podremos detectar el cáncer por niveles elevados de moléculas angiogénicas en sangre, mucho antes de que se presenten los síntomas. Los médicos podrían explorar regularmente a sus pacientes con pruebas moleculares y nuevas técnicas de formación de imágenes para determinar mejor el perfil individual de factores proangiogénicos y antiangiogénicos.

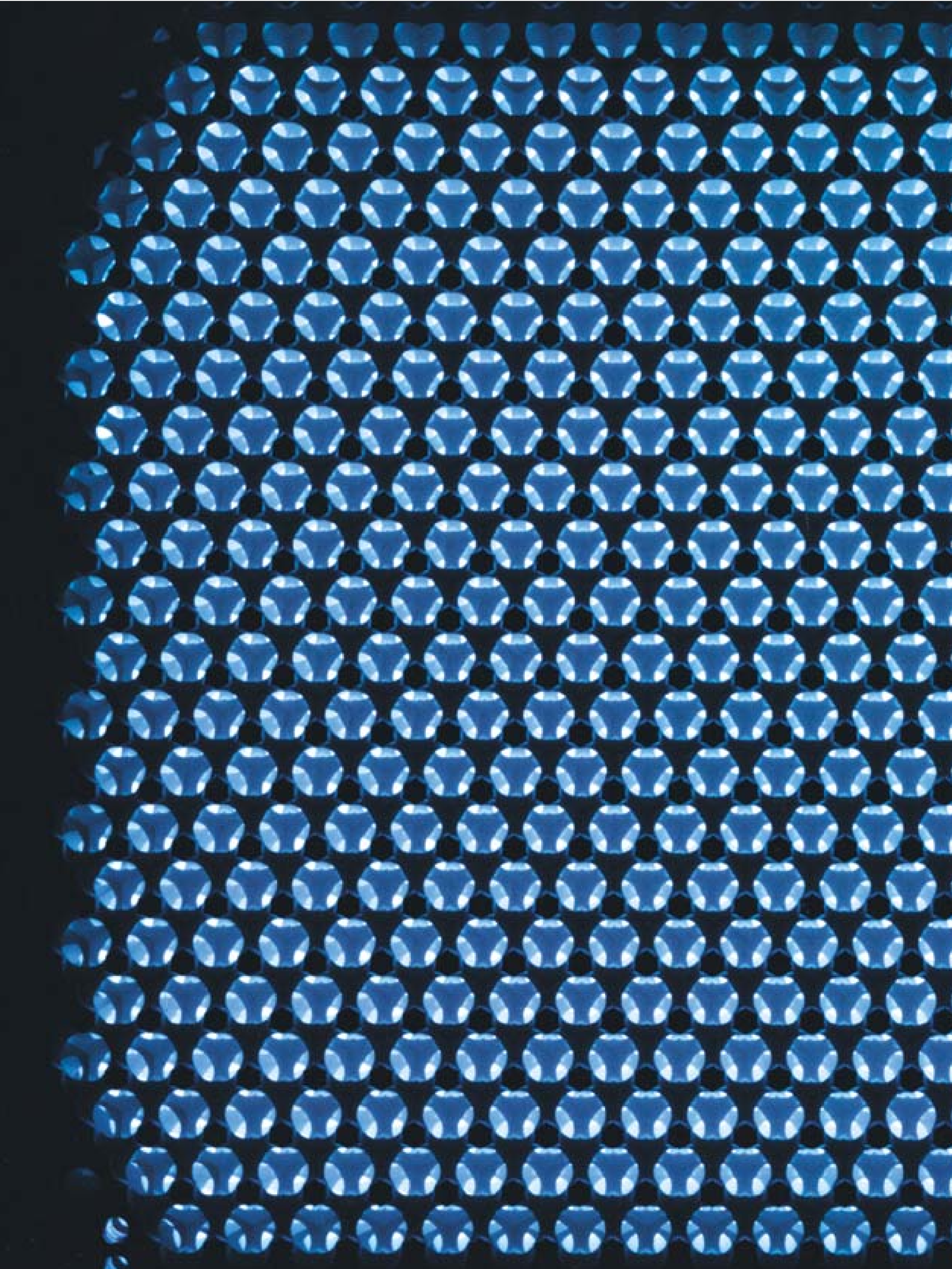
A partir de esas pruebas, los médicos sabrán establecer estrategias terapéuticas que, además de otros tratamientos, incluyan una combinación de los inhibidores de la angiogénesis más apropiados para ese tumor en concreto. Los exámenes que detecten la presencia de vasos anormales permitirán una identificación precoz de las recidivas, en estados de desarrollo tumoral susceptibles de un tratamiento más eficaz. Tal vez cuando se desarrollen fármacos antiangiogénicos de administración oral y se facilite su distribución, los pacientes con cáncer podrán tomar una pastilla al día para mantener el cáncer a raya. Si así fuera, algunas formas de cáncer hoy sin tratamiento podrían controlarse como un problema de salud crónico (lo mismo que la hipertensión o la diabetes) y permitir una vida larga y llena de satisfacciones.

Bibliografía complementaria

AN ADDRESS SYSTEM IN THE VASCULATURE OF NORMAL TISSUES AND TUMORS. E. Ruoslahti y D. Rajotte en *Annual Review of Immunology*, vol. 18, páginas 813-827; 2000.

ANGIOGENESIS IN CANCER AND OTHER DISEASES. P. Carmeliet y R. K. Jain en *Nature*, vol. 407, páginas 249-257; 14 de septiembre, 2000.

ANGIOGENESIS. J. Folkman en *Harrison's Principles of Internal Medicine*. Quinta edición. Dirigido por E. Braunwald, A. S. Fauci, D. L. Kasper, S. L. Hauser, D. L. Longo y J. L. Jameson. McGraw-Hill, 2001.



Cristales fotónicos

Eli Yablonovitch

Estos materiales nanoestructurados con formaciones ordenadas de agujeros podrían llevarnos a una revolución optoelectrónica. Realizan con luz lo que los semiconductores hacen con electrones

1. EL PRIMER CRISTAL FOTONICO que funcionó se hizo taladrando, en un bloque de material cerámico, tres matrices de agujeros que se cruzaban. En cada grupo los agujeros —paralelos entre sí— forman 35 grados de inclinación con la vertical y dan lugar a la estructura conocida por yablonovita. Dicho diseño de agujeros de seis milímetros de diámetro corta ondas de radio de entre 13 y 16 gigahertz.

Era la segunda llamada exasperante que recibía. Otro grupo de teóricos repetía que mi descubrimiento no funcionaba. Me embargaba una sensación de frustración. Había empleado tres largos años en probar y descartar innumerables diseños para llegar a lo que yo creía era un éxito. Pero si los teóricos andaban en lo cierto, tendría que volver al laboratorio y seguir buscando. Tal vez lo que estaba intentando crear —un cristal artificial capaz de manipular haces de luz a la manera en que el silicio y otros semiconductores controlan la corriente eléctrica— no fuera ni siquiera posible.

Los semiconductores electrónicos constituyen la entraña de todos los computadores y demás artilugios distintivos de la economía global. Los semiconductores ópticos podrían llevar la revolución de la información y las telecomunicaciones un paso más adelante al permitir, llegado su momento, sustituir nuestros microchips por fibras ópticas de mayor capacidad, láseres nanoscópicos y circuitos integrados fotónicos.

Pese al inicio tambaleante a finales de los ochenta y al general escepticismo por parte de la comunidad científica en sus comienzos, el campo de los cristales fotónicos ha florecido. Por doquier han aparecido empresas (yo he fundado un par) que están desarrollando productos comerciales. La clave estaba en hacerles ver a los escépticos su error demostrándoles que era posible crear para la luz la misma clase de fenómenos que se dan en semiconductores electrónicos, a saber, la brecha o intervalo de banda.

En electrónica, se llama intervalo de banda a una franja estrecha de energías que los electrones no pueden ocupar. Cuando los electrones de un semiconductor llenan todos los estados disponibles por debajo de esa brecha, no pueden fluir, por la sencilla razón de que los electrones no tienen dónde ir. Catapultar un electrón por encima de la brecha cuesta mucha energía. Si hay unos pocos electrones en exceso, deben acomodarse automáticamente en estados por encima del intervalo prohibido, donde pueden viajar por los amplios espacios de estados vacíos. De igual forma, un déficit de electrones abre "huecos", dotados de carga positiva, justo debajo de la brecha, posibilitando así el flujo expedito de corriente.

La magia que rodea a los semiconductores —la conmutación y las funciones lógicas— surge del control sobre la disponibilidad de electrones y huecos por encima y por debajo del intervalo prohibido. La existencia y propiedades de esa brecha en las bandas electrónicas dependen, fundamentalmente, del tipo de átomos del material y de la estructura cristalina de éstos (el espaciado y la forma de la red). Mediante la sustitución por otros átomos (llamados dopantes) en la red o sus intersticios, los ingenieros deciden el número de electrones o huecos del semiconductor y, así, pergeñan sus propiedades.

En el silicio y otros semiconductores los átomos están separados por un cuarto de nanómetro, más o menos. Los materiales de brecha fotónica presentan estructuras similares, si bien a escalas mucho mayores. Un ejemplo típico sería un bloque de cierto vidrio atravesado por grupos de perforaciones cilíndricas equiespaciadas en que cada agujero tenga un diámetro de unos 400 nanómetros. Estos poros desempeñan un papel análogo al de los átomos de un semiconductor. En general, aunque no siempre, el espaciado de las perforaciones ha de ser razonablemente parecido a la longitud de onda de la luz o radiación electromagnética que se desea controlar. La longitud de onda de luz visible se halla entre 400 y 700 nanómetros; los teléfonos móviles utilizan ondas de unos 35 centímetros.

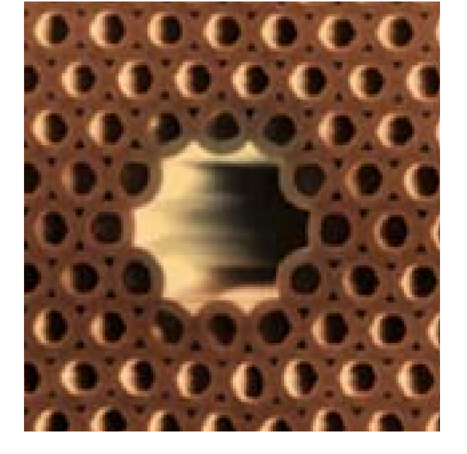
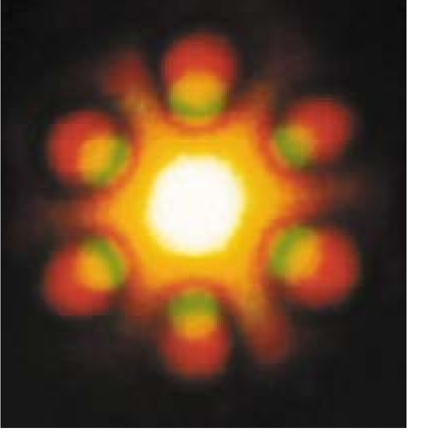
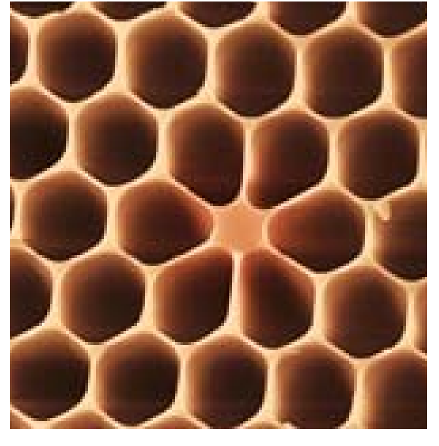
La luz que penetra en ese material agujereado se refractará en parte y, en parte también, se reflejará en los millares de interfaces internas entre aire y vidrio. En virtud del complejísimo patrón de rayos superpuestos, éstos se reforzarán o anularán según la longitud de onda, su dirección, el índice de refracción del vidrio y el tamaño y distribución de los agujeros. La cancelación completa para todas las direcciones de propagación en una estrecha banda de longitudes de onda es como el intervalo de energía prohibido para los electrones en un semiconductor: esa banda de luz no puede propagarse por el cristal. Si se altera la estructura de bandas —por ejemplo, rellenando algunos agujeros— se producirán otros efectos, similares a los que ocurren con el dopado en semiconductores. A menudo se construye un cristal fotónico con un material que es semiconductor electrónico; en ese caso, el cristal, además de intervalo de banda electrónica, tiene brecha fotónica.

Resumen/Cristales fotónicos

- La microelectrónica y la revolución de la información se basan en el estricto control de la corriente eléctrica logrado con semiconductores de silicio. Dicho control depende de la brecha o intervalo de banda: un rango de energías en que los electrones ven bloqueada su propagación por el semiconductor.
- Se han producido materiales con brecha fotónica: un rango de longitudes de onda de la luz que ve impedida su propagación por el material. A ello se ha llegado gracias a la estructuración de materiales con una cuidadosa trama a una escala mesoscópica. Estos cristales fotónicos funcionan como "semiconductores lumínicos" y prometen innumerables aplicaciones técnicas.
- Muchos recibieron la idea de una brecha para bandas fotónicas con escepticismo. Hoy, los cristales fotónicos se están convirtiendo en un negocio importante. Los cristales fotónicos hallarán su aplicación en fibras ópticas de gran capacidad, pigmentos y circuitos integrados fotónicos que no sólo manipularían la corriente electrónica sino la luz también.

500.000 agujeros

La búsqueda del intervalo en las bandas fotónicas se inició sin apenas ruido en 1987. Con dos meses de diferencia, se enviaron sen-

2. LAS FIBRAS OPTICAS aplican el principio de intervalo de banda fotónico para guiar la luz. La envoltura formada por cientos de capilares de vidrio constituye un material óptico de brecha fotónica que confina la luz en el agujero central, de unas 15 micras de diámetro (*izquierda*). En el diseño de la derecha, en que la luz se confina en el núcleo sólido de unas dos micras, la fibra es altamente no lineal, lo que puede ser útil para conmutar y corregir la forma de los pulsos de luz. En el centro se ilustra, por medio de un patrón de colores, la variación del confinamiento en una fibra de cristal fotónico, para diferentes longitudes de onda.

das propuestas independientes para su publicación. El autor firmaba una; remitía la otra Sajeev John, desde la Universidad de Princeton. A cada uno nos movía un objetivo distinto. Trabajaba yo para la empresa Bell Communications Research; pretendía construir láseres de comunicaciones más eficientes. La mayor parte de la corriente consumida para producir la emisión láser se malgasta en fotoemisión espontánea; un intervalo fotónico prohibido podría suprimir ese dispendio: los átomos no pueden emitir luz espontáneamente cuando forman parte de un material que prohíbe la propagación de la luz.

John, por el contrario, perseguía un objetivo de investigación pura. Postulaba la brecha en las bandas fotónicas para confinar la luz. La contrapartida electrónica de ese fenómeno de localización de la luz, así se conoce, es un efecto cuántico llamado localización electrónica, que se da en materiales desordenados, en semiconductores amorfos por ejemplo. El desorden atrapa, o confina (localiza), electrones en sitios fijos obstruyendo el flujo de corriente.

John y yo no nos conocíamos. Pero cuando supimos de nuestras propuestas convergentes concertamos un encuentro. Presentíamos que teníamos algo importante entre manos y acordamos emplear la misma terminología: "brecha fotónica" y "cristal fotónico". Regresé a mi laboratorio algo más animado de la cuenta. Creí que podría fabricar el primer modelo que funcionara en sólo unos meses.

Aunque el adjetivo "fotónico" se predica de la luz, el principio del intervalo de bandas se aplica igualmente a ondas electromagnéticas de cualquier longitud de onda. Por consiguiente, podría yo tantear con estructuras dotadas del espaciado entre filas más conveniente y ensayarlas con la radiación electromagnética apropiada. Empecé la búsqueda en un taller mecánico tallando estructuras en planchas de material dieléctrico con un taladro. Sólo la imaginación humana podía poner límite al diseño y la estructura. Pero ahí radicaba otro problema. Ante las innumerables elecciones posibles, ¿qué diseño produciría el deseado intervalo de banda fotónico?

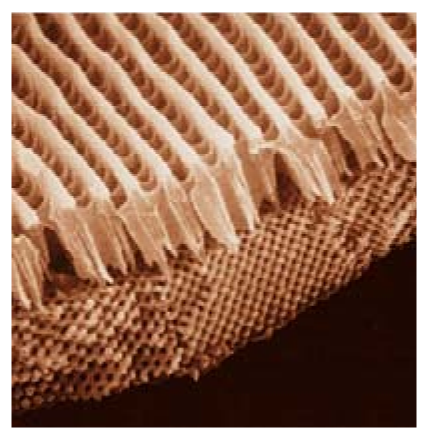
En los cristales de semiconductores electrónicos, el intervalo de banda se abre debido a que los electrones se comportan, en parte, como ondas; las filas y capas de átomos esparcen dichas ondas. Parte de la onda se dispersa hacia atrás, por donde vino; si la longitud de onda se aproxima al espaciado entre capas de átomos sucesivas, todas las ondas retrodispersadas se sumarán coherentemente. Resultado de ello, la onda electrónica se verá reflejada en su integridad, como la luz en un espejo. Para que un intervalo prohibido sea pleno, se requiere que la reflexión cabal se dé en un amplio espectro de longitudes de onda y para frentes de onda que viajen en cualquier dirección a lo largo del cristal.

Sabía que, para tener un intervalo de banda electromagnético, no bastaba con emular un cristal de silicio. En el caso de la luz, la difusión se produce por cambios en el índice de refracción (entre el vidrio y el aire); una interacción directamente comparable con la de los electrones y el silicio requeriría un índice de refracción muy alto.

No resulta inmediato inferir una estructura a partir de los principios teóricos: la brecha depende de la interacción entre la luz y cientos de agujeros, un proceso harto complicado. Los teóricos han desarrollado modelos de ordenador para cálculos correspondientes a semiconductores. Ahora bien, tales programas no sirven para fotones. Primero, porque son diferentes las ecuaciones del movimiento. Los electrones obedecen a la ecuación de Schrödinger, en tanto que el comportamiento de la luz viene determinado por las ecuaciones de Maxwell. Segundo, no se puede ignorar la polarización de los fotones como se hace con los electrones. En resumen, no podía yo prever si una estructura propuesta acabaría presentando un intervalo de

El autor

ELI YABLONOVITCH fue uno de los inventores del concepto de brecha fotónica y fabricó el primer cristal con intervalo de banda fotónico mientras trabajaba en Bell Communications Research en Nueva Jersey. En 1992 se trasladó al departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de California en Los Angeles.


3. LOS CRISTALES FOTONICOS NATURALES se dan en las alas de las mariposas (*izquierda*) y los ópalos (*derecha*). En ambos casos el intervalo es incompleto —no es efectivo en todas las direcciones—, pero produce colores iridiscentes. La micrografía de una escama iridiscente de una mariposa verde (*centro*) muestra en su interior la estructura cúbica centrada en las caras de tamaño submicrométrico. Los ópalos constan de esferas de sílice, submicrométricas y apiladas en una estructura cúbica centrada en las caras (empaquetamiento compacto).

banda fotónico. Y así, guiados no menos por la intuición física que por los cálculos, mis colaboradores y yo fabricamos estructura tras estructura en busca de la buena. A lo largo de cuatro años mi mecánico, John Gural, taladró más de 500.000 agujeros en planchas dieléctricas (aislantes) auxiliado por una máquina con control numérico. Era desmoralizante marrar una vez tras otra en los diseños.

La sorpresa del diamante

Esperábamos que la estructura cúbica centrada en las caras (ccc) fuera la adecuada para generar intervalos de banda electromagnéticos. Se puede crear esta estructura tomando un tablero de ajedrez y poniendo cubos negros en las casillas blanca y blancos en las casillas negras. En la segunda capa, se sigue colocando cubos negros sobre blanca y viceversa, y así sucesivamente. Los cubos negros (y por su lado también los blancos) forman una red ccc.

Pero semejante estructura permitía todavía una variedad infinita de elecciones; podían sustituirse los cubos negros por cualquier otra forma geométrica, con el cambio consiguiente del patrón de refracción y reflexión de las ondas lumínicas. Tras dos años de trabajo, llegamos a algo que parecía funcionar: una estructura ccc en la que se había sustituido cada cubo negro por un hueco esférico en el material. Publiqué este resultado, pero estaba equivocado.

Por aquel entonces los teóricos habían empezado a abordar la cuestión. Algunos habían adaptado sus programas de cálculo de estructura de bandas para que trabajaran con luz. K. Ming Leun y Kai Ming Ho, entre otros teóricos, descolgaron el teléfono con las intenciones descritas al principio. Mi estructura ccc, tan tenazmente perseguida, sólo tenía una pseudobrecha: una banda prohibida de anchura cero, lo cual significa que hay una, y sólo una, longitud de onda que está prohibida. Parecía que la naturaleza no iba a permitir que existiera un intervalo de banda fotónico. Tal vez fuera precisa una sustancia con un índice de refracción mucho mayor que el de los materiales transparentes conocidos.

En unas semanas, sin embargo, el grupo de Iowa encontró que la estructura de diamante, la geometría tetraédrica asociada con la joya, produciría un intervalo de banda. La forma que abre la brecha más ancha consta de barras dieléctricas en las posiciones de los enlaces químicos entre átomos de carbono, con los átomos reducidos a puntos. El diamante no es, en sí mismo, que se sepa, un material con brecha fotónica. Recordé antes que, cuando empezamos nuestra investigación, sabíamos que no podíamos emular la estructura del cristal de silicio para generar una brecha en las bandas fotónicas. ¡Qué equivocados estábamos! La estructura cristalina del silicio es justamente la del diamante.

Que la estructura tetraédrica sea la mejor para hacer una brecha en las bandas fotónicas fue un hallazgo de profundo calado. Antes de la llegada de los cristales fotónicos, la configuración del diamante no era más que otra estructura mineral, surgida de una compleja interacción entre átomos, enlaces químicos y minimización de energía en condiciones adecuadas de temperatura y presión. Su capacidad para formar una brecha en las bandas fotónicas, que emerge entera y exclusivamente de las ecuaciones de Maxwell (las leyes de la electricidad, el magnetismo y la luz), muestra que la configuración de diamante encierra también una importancia capital por lo que concierne al magnetismo y la geometría del espacio tridimensional.

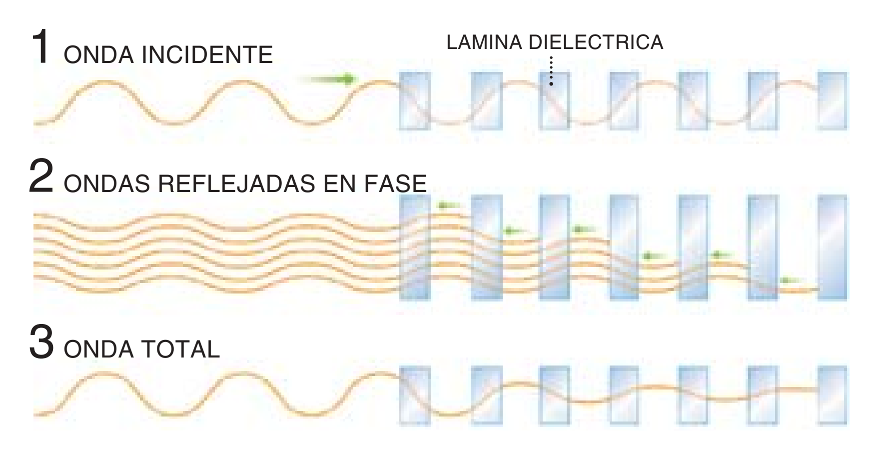
La estructura tetraédrica del diamante adopta muchas apariencias; dependen éstas de la forma que se ubica en cada sitio de la red, así como del punto de vista en que se observa el cristal. El recuadro "Bandas en todas las dimensiones" incluye dos cristales fotónicos muy distintos, basados en la estructura de diamante. Mi grupo creó el primer cristal con brecha en las bandas fotónicas (y esta vez de verdad) en 1991, sirviéndose de una

BANDAS EN TODAS LAS DIMENSIONES

UNA DIMENSION

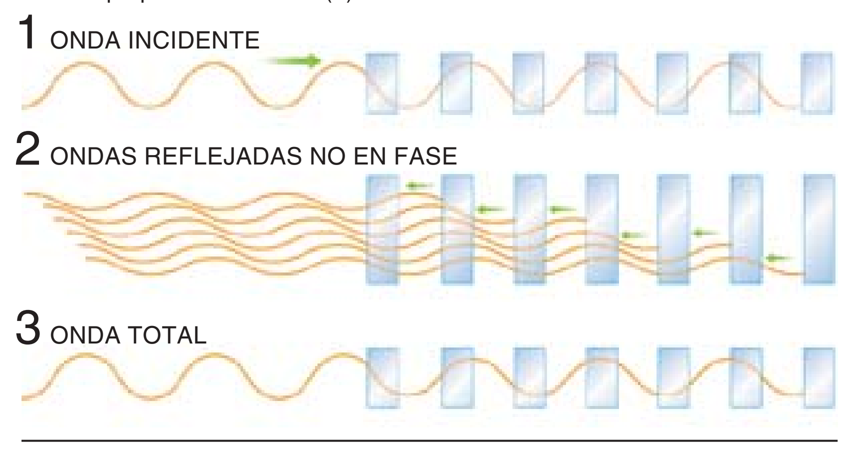
LONGITUDES DE ONDA EN EL INTERVALO DE BANDA

La onda incidente sobre un material de intervalo fotónico (*1*) se refleja parcialmente en cada capa de la estructura (*2*). Las ondas reflejadas están en fase y se refuerzan. Su combinación con la onda incidente origina una onda estacionaria (*3*), que no se propaga a través del cristal.



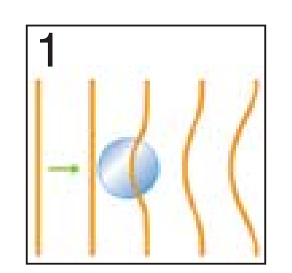
LONGITUDES DE ONDA FUERA DEL INTERVALO PROHIBIDO

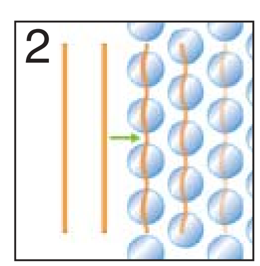
Cuando la longitud de onda no se encuentra en el intervalo de banda (*1*), las ondas reflejadas se cancelan (*2*). La luz se propaga por el material con una pequeña atenuación (*3*).

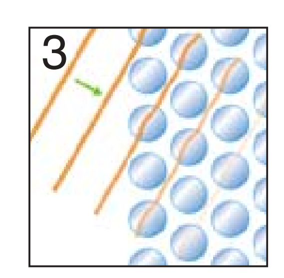


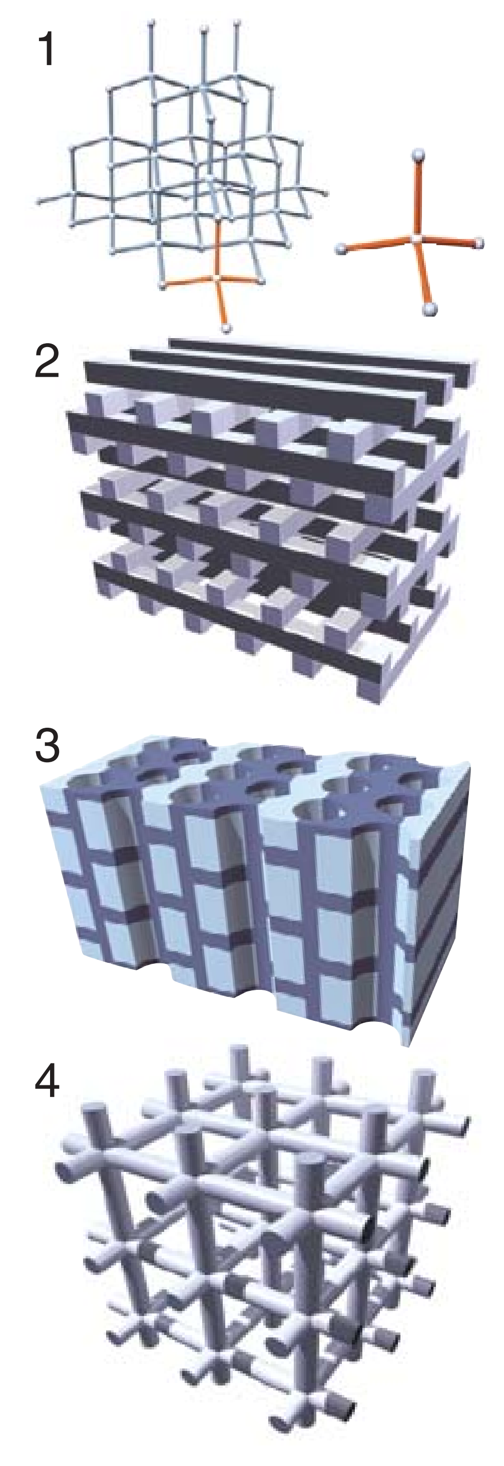
DOS DIMENSIONES

En un sistema bidimensional, cada celda unidad de la estructura (*1*) produce ondas reflejadas (*no se muestran*) y ondas refractadas, que han de combinarse para cancelar la onda incidente (*2*), sin importar en qué dirección viaja (*3*). Un material de brecha tridimensional funciona de la misma forma, si bien en las tres dimensiones.









TRES DIMENSIONES

La configuración tetraédrica del diamante (*1*) constituye la geometría más eficaz para crear materiales de brecha fotónica tridimensionales. Esta geometría queda disfrazada en la yablonovita, en la “pila de troncos” (*2*) y en este diseño (*3*) que usa canales de sílice (*claros*) en silicio (*oscuro*). La estructura en andamio (*4*) es un raro ejemplo con una estructura subyacente distinta, pero tiene sólo un estrecho intervalo.

variante de la estructura de diamante conocida hoy por yablonovita. Después de todo, la naturaleza es agradecida: en la estructura de diamante se da un intervalo de banda para índices de refracción de sólo 1,87; hay materiales ópticos disponibles con índices de refracción de hasta 3,6.

La estructura de diamante no es la única con un intervalo fotónico. En 1992 el teórico Joseph W. Haus demostró que habíamos descartado las estructuras ccc demasiado pronto. Se habían buscado brechas en la estructura de bandas fotónicas de la ccc sólo a longitudes de onda para las que aproximadamente media onda encaja en una celda de la red (algo así como la vibración fundamental de una cuerda de guitarra). Como vimos, a esa frecuencia sólo se abre una pseudobrecha. Haus, sin embargo, consideró también frecuencias mayores para las que una onda entera encaja en una celda (algo así como el primer armónico de la cuerda de guitarra); demostró que en la ccc se abre una brecha en esa precisa ubicación. Además, descubrió que la propia configuración simple cúbica a la que se llama estructura en andamio (por su similitud con dicho armazón) puede tener una brecha, aunque pequeña.

Mariposas y microchips

Sabemos ya que la naturaleza crea también cristales fotónicos en los chispeantes ópalos, en las alas cromáticas de las mariposas y en las cerdas del ratón de mar, un gusano. Todos ellos presentan una estructura de bandas fotónicas, aunque no una brecha plena, pues la luz puede propagarse al menos en algunas direcciones. La realización de una brecha plena ha eludido a la naturaleza quizá debido a que requiere un contraste de índices de refracción demasiado alto.

En cualquier caso, una brecha incompleta puede resultar muy útil. Por ejemplo, partículas de dióxido de titanio de tamaño inferior a una micra pueden llegar a ordenarse en una estructura opalina. El dióxido de titanio constituye el pigmento blanco que se usa en la pintura y para blanquear el papel. La dispersión coherente de la luz que tiene lugar en el dióxido de titanio estructurado con intervalo de bandas puede dotar de mayor blancura a cantidades inferiores de dicho material. Quizás algún día los cristales fotónicos inunden nuestro entorno, desde las paredes pintadas hasta los montones de papel que cubren nuestras mesas de despacho.

Existe otro tipo, muy útil, de material de brecha incompleta. Se trata de los cristales fotónicos bidimensionales que pueden bloquear la propagación de la luz en un plano. Tales estructuras, estiradas en la tercera dimensión, originan un nuevo tipo de fibras ópticas. Las fibras ópticas clásicas tienen un núcleo de alto índice que confina la luz por reflexión total interna. En 1999, Phillip St. J. Russell mostró el camino para construir tales fibras de intervalo fotónico. En una versión, la luz viaja a lo largo de un agujero central, confinada ahí por el intervalo fotónico del material que lo rodea. Por tal hueco central se puede inyectar más potencia óptica que por vidrio, permitiendo mayores capacidades de transporte de información, hasta centuplicar acaso la potencia de las fibras de telecomunicaciones al uso. De entre los productos comerciales cuya técnica se basa en el concepto de brecha fotónica, este tipo de fibras especiales es el que más ha avanzado. En Dinamarca y en el Reino Unido algunas empresas ya han distribuido pequeñas cantidades; pronto pasarán a la producción en masa.

En vez de estirar un sistema bidimensional para crear una fibra, podemos avanzar hacia el otro extremo y crear una lámina delgada a partir de un cristal fotónico bidimensional, como calcularon en 1997 Shanhui Fan y John D. Joannopoulos. Sin particular dificultad, y por métodos estándar, pueden convertirse los cristales fotónicos de lámina delgada en circuitos integrados. La introducción de defectos en una estructura con intervalo de banda se asemeja al dopado en semiconductores electrónicos. Posibilita un gran abanico de funciones. Hallamos un ejemplo de dopante en el agujero central de las fibras de cristal fotónico. De manera similar, al rellenar uno de los agujeros de un cristal en lámina

APLICACIONES DE LOS CRISTALES FOTONICOS

DISPOSITIVO	DESCRIPCION	ESTADO
FIBRAS OPTICAS	Material bidimensional de intervalo de banda, estirado en la tercera dimensión	Primeras versiones ya comercializadas
LASERES NANOSCOPICOS	Las cavidades ópticas más pequeñas del mundo y los láseres más pequeños; formados en un material fotónico bidimensional de lámina delgada	Demostrado en laboratorio
PIGMENTOS ULTRABLANCOS	Material fotónico con brecha tridimensional incompleta, de textura similar a las estructuras opalinas	Demostrado; métodos de manufacturación de bajo coste, en desarrollo
ANTENAS Y REFLECTORES DE RADIOFRECUENCIAS	Se sirven de inductancias y capacitancias en vez de dieléctricos ordinarios	Demostrados para resonancia magnética y antenas
DIODOS EMISORES DE LUZ	Las estructuras de brecha fotónica pueden extraer luz con gran eficiencia (más de 50 %)	Demostrados, aunque han de competir con otros métodos
CIRCUITOS FOTONICOS INTEGRADOS	Las láminas delgadas con estructura bidimensional pueden servir para grabar, al modo de los circuitos integrados clásicos, filtros, moduladores, acoples, etc.	En desarrollo

delgada se produce el elemento crítico de los láseres, a saber, una diminuta "cavidad" que puede albergar un modo electromagnético local. (Imagine el lector una pequeña onda estacionaria de luz atrapada entre dos espejos.) Recientemente el grupo de Axel Scherer recurrió a estas pequeñísimas cavidades para construir láseres no mayores que 0,03 micras cúbicas de volumen, los más pequeños jamás construidos.

La grabación litográfica sobre cristales fotónicos en lámina delgada para encastrar circuitos ópticos representaría el límite último de miniaturización optoelectrónica. Muchos sostienen que los circuitos integrados que combinan electrónica y fotónica están listos para generalizar la revolución de los circuitos integrados al dominio de las señales ópticas de banda ancha. El desarrollo de dispositivos basados en el fenómeno de intervalo de banda fotónico probablemente atraerá la máxima atención en los próximos años, aunque los productos comerciales se encuentren todavía a dos o tres años vista.

No es de esperar que los cristales de ondas electromagnéticas sean de gran utilidad para ondas de radio, ya que requerirían cristales demasiado grandes. Los teléfonos móviles, por ejemplo, utilizan ondas de radio de unos 35 cm. Un cristal con muchos agujeros o barras de ese tamaño y espaciado difícilmente podría reputarse portátil. A nuestro rescate acude el circuito LC ordinario de la electrónica, que combina una inductancia (bobinado; L) y una capacidad (condensador; C). Tales circuitos pueden comprimir una onda electromagnética en un pequeño volumen. Un ordenamiento de circuitos LC puede comportarse como un cristal fotónico y controlar las ondas electromagnéticas que tienen longitudes de onda mucho mayores que el espaciado.

Luz reversa

Por medio de ordenamientos de circuitos LC, Sheldon Schultz y David R. Smith crearon materiales de mano izquierda, que tienen un índice de refracción negativo para frecuencias de microondas. En éstos, las ondas electromagnéticas viajan hacia atrás: cuando las crestas de las ondas se mueven de izquierda a derecha, ¡la energía de la onda se transmite de derecha a izquierda!

John B. Pendry ha utilizado dispositivos LC con intervalo de banda electromagnético para manipular campos magnéticos de radiofrecuencia de los usados con fines médicos en resonancias magnéticas. Hay consorcios para la investigación en industria, defensa y universidades (incluyendo mi grupo) que estudian el empleo de ordenamientos de resonadores LC para controlar ondas de radio. Entre las posibles ventajas de tales dispositivos se encuentra la fabricación de antenas GPS de mayor precisión, al reducir las reflexiones en la Tierra y aumentar la eficiencia del teléfono móvil por la reducción del acople con la cabeza del usuario.

No parece imposible que estos circuitos LC se introduzcan en el dominio de las longitudes de onda ópticas. Tales dispositivos harían uso de plasmones, que son corrientes oscilantes a frecuencias ópticas en superficies metálicas. Los ordenamientos de tan diminutos circuitos LC, menores incluso que la longitud de onda óptica, podrían suponer el límite último de la miniaturización de cristales fotónicos.

Algunos aventureros han de confiar contra toda esperanza; de lo contrario, nunca iniciarían su viaje ni perseverarían hasta el final. Cuando me paro a considerar la magnitud de la actividad desarrollada hoy en este campo, me alegro de que, hace diez años, tomara aquellas desalentadoras llamadas como un acicate para proseguir las investigaciones y resolver los problemas.

Bibliografía complementaria

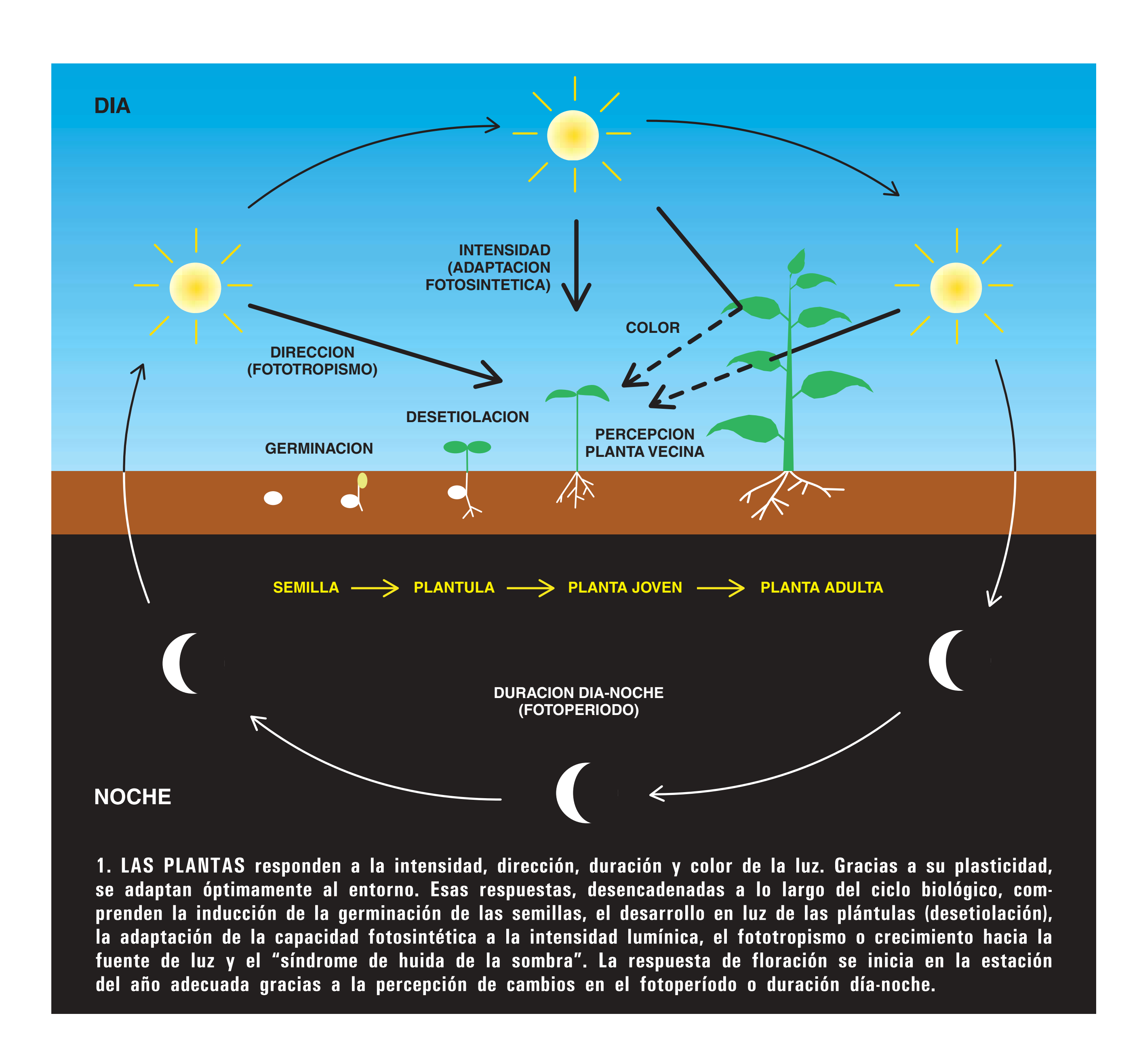
PHOTONIC CRYSTALS: MOLDING THE FLOW OF LIGHT. John D. Joannpoulos, Robert Meade y Joshua N. Winn. Princeton University Press, 1995.

OPTICAL PROPERTIES OF PHOTONIC CRYSTALS. Kasuaki Sakoda. Springer Series en *Optical Sciences*, vol. 80. Springer Verlag, mayo 2001.

Fitocromos y desarrollo vegetal

Los fitocromos son unos pigmentos vegetales que controlan diferentes aspectos del desarrollo e informan a las plantas de los cambios operados en el entorno para optimizar su crecimiento

Jaime F. Martínez García, Elena Monte y Francisco J. Ruiz Cantón

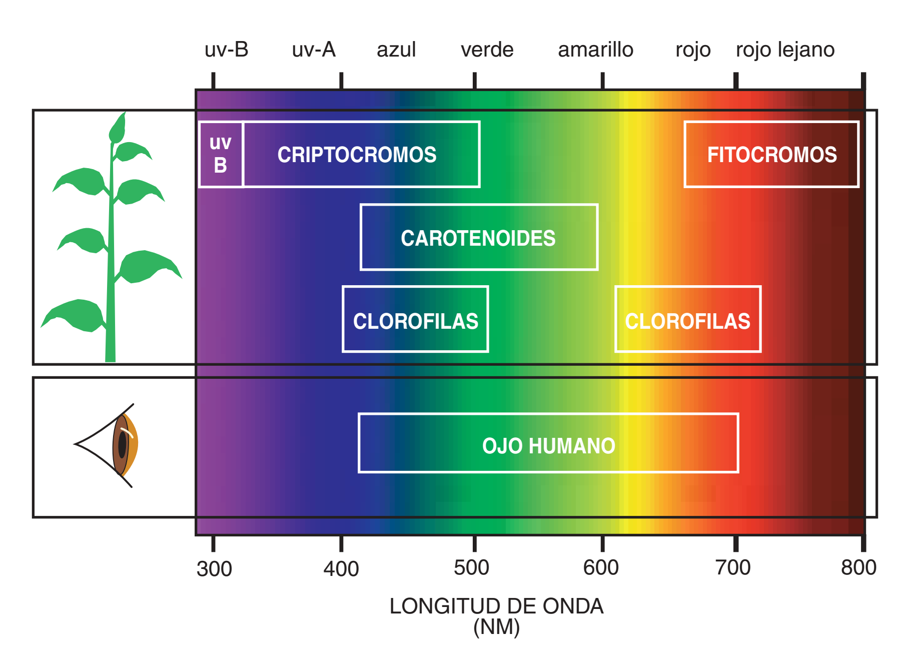


1. LAS PLANTAS responden a la intensidad, dirección, duración y color de la luz. Gracias a su plasticidad, se adaptan óptimamente al entorno. Esas respuestas, desencadenadas a lo largo del ciclo biológico, comprenden la inducción de la germinación de las semillas, el desarrollo en luz de las plántulas (desetiolación), la adaptación de la capacidad fotosintética a la intensidad lumínica, el fototropismo o crecimiento hacia la fuente de luz y el "síndrome de huida de la sombra". La respuesta de floración se inicia en la estación del año adecuada gracias a la percepción de cambios en el fotoperíodo o duración día-noche.

Las plantas, fijas en el suelo, no pueden ir en busca de condiciones ambientales óptimas. El lugar donde germina la semilla determina la disponibilidad de luz, agua y nutrientes. De entre esos factores, la luz cumple un papel principal a lo largo del ciclo biológico. Sirve de carburante en la fotosíntesis, que posibilita la formación y desarrollo de hojas, tallos, raíces y flores.

La luz constituye también una fuente de información sobre el entorno. Las plantas "perciben" diferentes segmentos de su espectro de radiación, así como su intensidad, duración, periodicidad y dirección. Detectan, además, los cambios de tales propiedades experimentados en el transcurso del año y del día o en la cercanía de otras plantas. En razón de esa información las plantas adaptan sus propios procesos, desde el momento de la germinación hasta la desetiolación, y el fototropismo o la floración. El conjunto de respuestas que afectan al desarrollo y aspecto de la planta en función de la luz se conoce como "fotomorfogénesis".

¿Cómo "perciben" las plantas las características de la luz del medio? La radiación solar consta de diferentes colores, acordes con las distintas longitudes de onda en que se transmite. Para captarlos, las plantas poseen receptores especiales, los pigmentos fotosensibles o fotorreceptores. De éstos, clorofilas y carotenoides absorben la gama que va del azul al rojo, implicada en la fotosíntesis. Pero en el control de la fotomorfogénesis participan otros fotorreceptores que captan y transmiten señales de diferentes regiones del espectro: el receptor de luz ultravioleta-B, los criptocromos, que captan la luz ultravioleta cercana y azul, y los fitocromos, que perciben la luz roja y roja lejana.



2. LA LUZ SOLAR se compone de diferentes colores, que se corresponden con luces de diferentes longitudes de onda (expresadas en nanómetros). El espectro visible al ojo humano cubre la región de 400 a 700 nm, mientras que las plantas "perciben" además las regiones del ultravioleta (uv) y del rojo lejano. Para ello están dotadas de distintos tipos de proteínas: receptores de luz uv-B (280-320 nm); criptocromos, que absorben mayoritariamente luz uv-A (320-390 nm) y azul (400-500 nm); clorofilas, que absorben luz azul y roja (600-700 nm); carotenoides, que absorben luz verde y amarilla (400-600 nm), y los fitocromos, que absorben luz roja y roja lejana (700-800 nm).

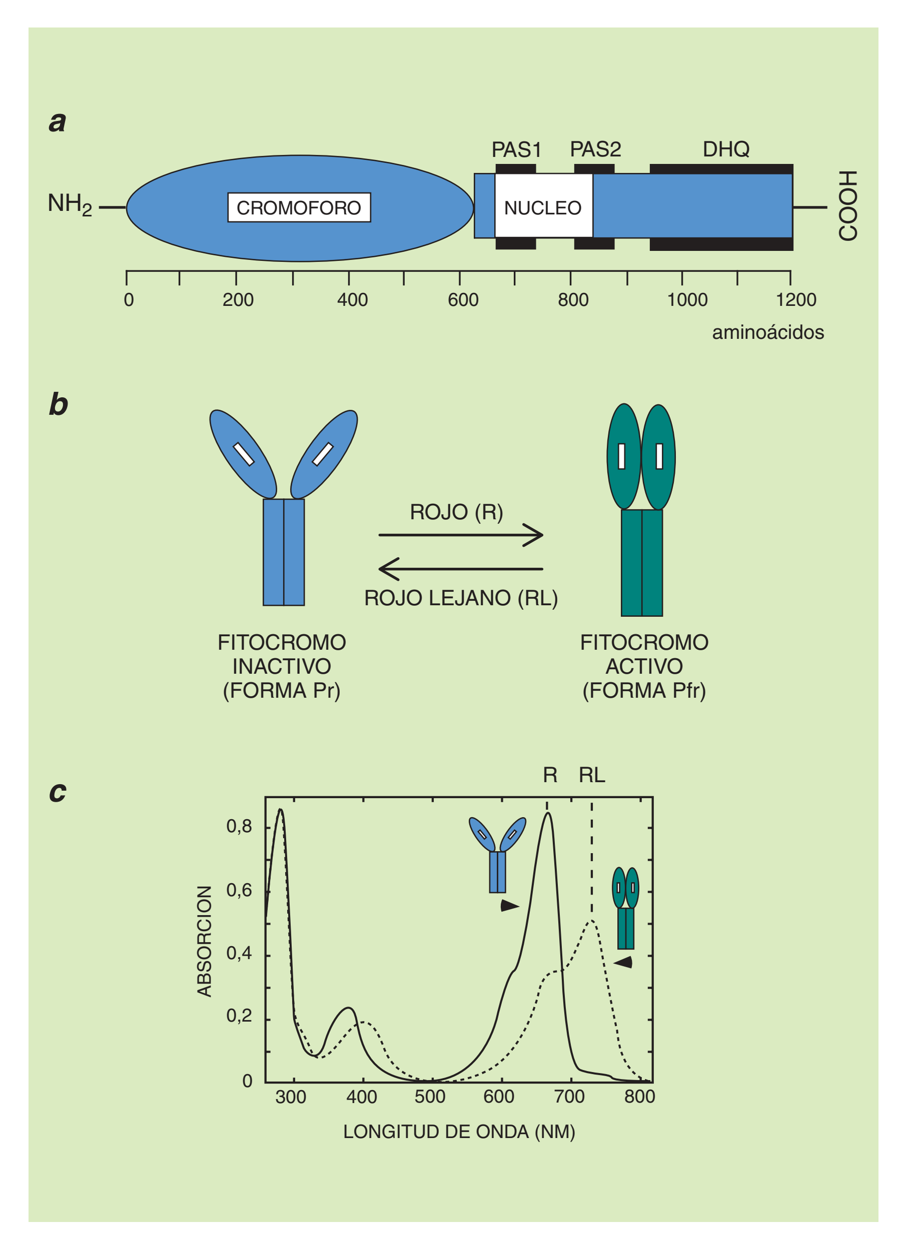
Los fitocromos se descubrieron en los años cincuenta en el marco de una investigación sobre el efecto de la luz en la germinación de las semillas de lechuga. Se observó que no llegaban al 20 % las semillas que germinaban en oscuridad; por contra, el porcentaje de germinación era máximo cuando irradiaban las semillas con un pulso de luz roja (R). Se halló, además, que la irradiación subsiguiente con un pulso de luz roja lejana (RL) anulaba el efecto inductor de la luz roja, evitando la germinación. Las irradiaciones alternas con luz R y RL (R, R + RL, R + RL + R, R + RL + R + RL, etcétera) pusieron de manifiesto que el último color aplicado determinaba la germinación de las semillas, y que la luz roja constituía el factor estimulante del proceso y, su inhibidor, la luz roja lejana.

En busca de una explicación de tales fenómenos se propuso la existencia de un pigmento, al que llamaron fitocromo, que absorbía la luz roja. El fitocromo en cuestión, tras absorber luz roja, se convertía en una forma capaz de absorber radiación roja lejana; forma que tornaba a su condición inicial tras realizar dicha absorción. La hipótesis halló respaldo experimental a principios de los años sesenta con la purificación, a partir de extractos de plántulas de cereales, de una proteína dotada de las características predichas. Los fitocromos son proteínas solubles que se encuentran en las semillas, hojas, tallos, raíces y demás órganos de la planta.

Aparecen en dos configuraciones intercambiables, denominadas

Los autores

JAIME F. MARTINEZ GARCIA, ELENA MONTE COLLADO y FRANCISCO J. RUIZ CANTON trabajan desde hace varios años en pigmentos vegetales. Martínez, actualmente en el Instituto de Biología Molecular de Barcelona, estudió en la Universidad de Valencia y completó su formación en el Instituto John Innes de Norwich y en el Centro de Expresión Génica de Plantas (PGEC) de Albany. Monte, que trabaja en esta última institución, se formó en la Universidad Autónoma de Barcelona. Ruiz, que también pasó por el PGEC de Albany, trabaja en el Departamento de Biología Molecular y Bioquímica de la Universidad de Málaga.



3. LOS FITOCROMOS son proteínas solubles constituidas por dos subunidades idénticas de unos 1200 aminoácidos y 125 kilodalton de masa molecular. Cada subunidad consta de un dominio amino terminal, globular, al que se une un cromóforo responsable de la absorción de la luz, y de un dominio carboxilo terminal, implicado en la dimerización y en la función reguladora del fitocromo (*a*). En el dominio carboxilo distinguimos el "núcleo", de interés en la transmisión de la información ambiental percibida, las regiones PAS1 y PAS2, implicadas quizás en interacciones entre proteínas, y la región DHQ, que debe su nombre a la semejanza que guarda con los dominios histidina quinasa. El dímero de fitocromo existe en dos formas fotoconvertibles (*b*): Pr, que absorbe luz roja, y Pfr, que absorbe luz roja lejana. Los fitocromos se sintetizan en la forma inactiva Pr; la absorción de luz roja produce un cambio reversible en la conformación de la proteína (acercamiento entre los extremos globulares de las dos subunidades del dímero) que la convierte a la forma activa Pfr. Esta última forma puede inactivarse y volver a la conformación Pr por la absorción de luz roja lejana. Los espectros de absorción de Pr y Pfr (*c*) se solapan en buena parte, lo que significa que la forma activa Pfr coexiste siempre con la inactiva Pr en un fotoequilibrio que se establece en función de la proporción relativa de luz roja y roja lejana de la irradiación incidente.

Pr y Pfr. De la absorción de la luz roja se encarga la forma Pr; de la radiación roja lejana, la forma Pfr. Puesto que en los procesos fisiológicos la luz roja tiene un efecto activador y la roja lejana un efecto inhibidor, Pfr se considera la forma biológicamente activa del fitocromo y Pr, la inactiva. Esta última se aloja en el citoplasma, mientras que la forma activa (Pfr) se localiza preferentemente en el núcleo celular.

Por tratarse de moléculas receptoras, los fitocromos cumplen dos funciones, una sensora y otra reguladora. La función sensora implica la percepción de la señal luminosa incidente. Compete a la función reguladora transferir la información recibida a los componentes de la cadena de transducción de la señal, encargada de transmitir la información captada a otros componentes celulares. En la naturaleza, donde la luz es policromática, los fitocromos operan a la manera de interruptores moleculares, que informan a la planta de la presencia y los cambios en las proporciones relativas de luz roja y de roja lejana del ambiente, para que acometa las respuestas fisiológicas oportunas.

Los fitocromos intervienen en el ciclo biológico de la planta, desde la germinación a la floración y tuberización, pasando por la desetiolación de las plántulas y el alargamiento de tallo y entrenudos. Según la cantidad y duración de irradiación requeridas para inducir esos procesos en condiciones controladas de laboratorio, se han clasificado las respuestas en tres tipos: respuestas de baja fluencia (RBF), respuestas de muy baja fluencia (RMBF) y respuestas de alta irradiancia (RAI).

Las respuestas de baja fluencia vienen inducidas por pulsos breves de luz roja; se anulan si se suministra un subsiguiente pulso de luz roja lejana. Son las que inicialmente identificaron procesos controlados por fitocromos, como la germinación. Para desencadenar una respuesta de muy baja fluencia bastan cantidades exiguas de cualquier longitud de onda entre 300 y 780 nm. Ocurre así en la

expresión de los genes *LHC*, que cifran proteínas del aparato fotosintético que unen clorofilas. Por fin, las respuestas de alta irradiancia se presentan ante una irradiación de intensidad moderada o elevada y continuada de luz R (Rc) o RL (RLc). El ejemplo mejor estudiado de este tipo de respuesta es el proceso de desetiolación, que consiste en el conjunto de cambios en el desarrollo de plántulas germinadas en oscuridad cuando se exponen a la luz.

La naturaleza fotorreversible de la molécula de fitocromo explica las respuestas RBF, emitidas ante un pulso de luz roja y anulables si, tras éste, se suministra un pulso de luz roja lejana. Las respuestas RMBF y RAI, que no revierten nunca, pueden iniciarse por luz roja lejana, un pulso en el caso de RMBF o irradiación continua en el caso de respuestas de alta irradiancia. El efecto inductor de la luz RL se explica en parte por el solapamiento de los espectros de absorción de las formas Pr y Pfr de los fitocromos, que implica la existencia de forma activa (Pfr) incluso tras irradiación con luz RL.

Los fitocromos pueden regular un proceso fisiológico a través de diversos modos de acción. La desetiolación presenta un componente de RBF y otro de RAI, la inducción de los genes *LHC* muestran un componente de RMBF y otro de RBF y la germinación de *Arabidopsis* se apoya en un triple componente de RMBF, RBF y RAI.

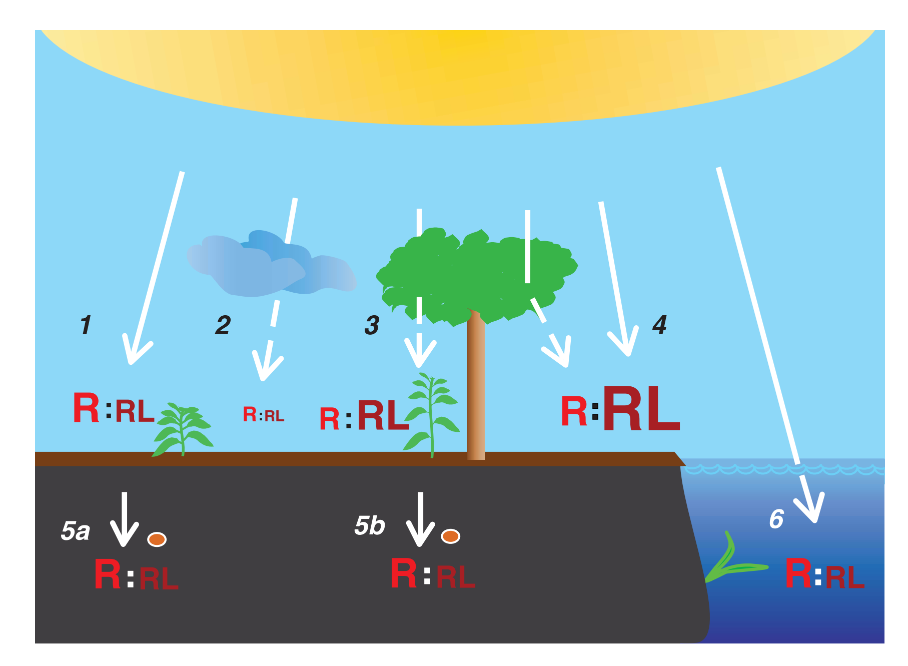
La variedad y complejidad de respuestas fisiológicas mediadas por luz roja y roja lejana sugirieron la posibilidad de que hubiera más de un tipo de fitocromo implicado en su regulación. A tenor de la investigación fisiológica, ciertas respuestas aparecían sometidas al control de un fitocromo fotolábil, que se degradaba tras la exposición a la luz, y otras sujetas a un fitocromo fotoestable, que no se degradaba tras la exposición.

Se agregaban a esos resultados los datos bioquímicos e inmunitarios que apoyaban la existencia de dos especies moleculares de fitocromos, los de tipo I y tipo II. Ambos fitocromos se convertían a la forma activa al absorber luz roja, pero diferían en la estabilidad *in vivo* tras la exposición; y así, la forma Pfr (activa) del tipo II era estable, y la forma Pfr del tipo I inestable al degradarse rápidamente.

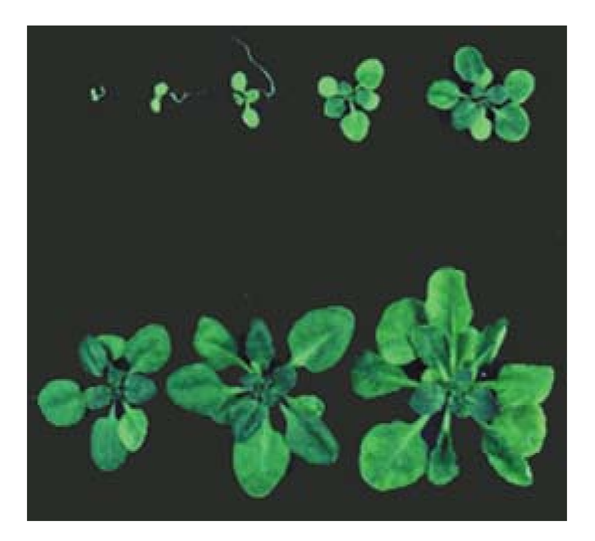
La confirmación definitiva de la existencia de fitocromos diferentes vino con la identificación de los ADN complementarios (ADNc, es decir, ADN transcrito a partir del ARN mensajero) que cifraban tales proteínas en una misma especie vegetal. Estas secuencias de ADNc sirvieron luego para aislar los correspondientes genes. Así, en *Arabidopsis thaliana* se aislaron hasta cinco genes distintos para los fitocromos A, B, C, D y E. Cuando se comparó la secuencia aminoacídica de esas cinco proteínas se observó que sólo un 50 % de los aminoácidos de la proteína son iguales, excepto los fitocromos B y D, que comparten un 80 % de la secuencia de aminoácidos.

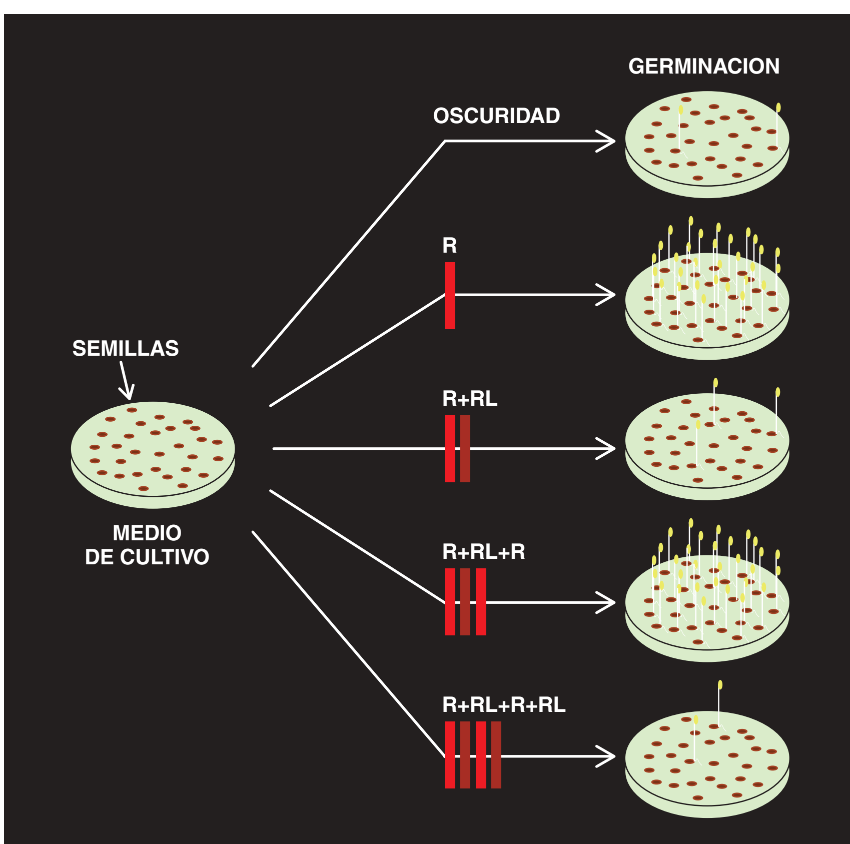
Del cotejo entre la secuencia de una porción del fitocromo de tipo I y las secuencias traducidas de ADNc de los genes identificados en diferentes especies se desprendía que el fitocromo A era el único de tipo I. Siguiendo un método similar, se vio que el fitocromo B era de tipo II. Los análisis de la abundancia relativa de los distintos fitocromos mostraron que los A y B constituían las formas predominantes en la plántula.

El fitocromo A se acumula en plántulas etioladas, para decaer de inmediato tras la exposición a luz



4. RAZON ENTRE LUZ ROJA Y ROJA LEJANA. Esa proporción percibida por las plantas, simbolizada por la expresión R:RL, constituye un índice de la densidad y la proximidad de vegetación. Esta razón establece un fotoequilibrio entre las formas Pr y Prf de los fitocromos. En la radiación solar directa, R:RL es constante, con valores entre 1,05 y 1,25 (*1*). Las condiciones climáticas apenas alteran la relación, aunque en un día muy nublado la intensidad total se puede reducir hasta 10 veces (*2*). Ante ciertas condiciones ecológicas sí varía la relación R:RL. Los pigmentos fotosintéticos de las plantas (clorofilas y carotenoides) absorben luz de casi todo el espectro visible, mientras que son casi transparentes al rojo lejano. Por eso, en la zona de sombra vegetal la relación R:RL disminuye hasta valores entre 0,05 y 0,15 (*3*). Parte del rojo lejano incidente se refleja, con la caída consiguiente de la razón en R:RL captada por las plantas vecinas (*4*). La relación R:RL de la luz que se filtra informa a la semilla enterrada o a la plántula emergente de las condiciones en la superficie (*5a, 5b*). Asimismo, un incremento de la relación R:RL puede informar a las plantas acuáticas de la profundidad a que se hallan, ya que el agua absorbe luz roja lejana (*6*).





5. UN EJEMPLO CLASICO de las respuestas mediadas por los fitocromos es el control por luz de la germinación de las semillas. En condiciones de oscuridad, el porcentaje de germinación es bajo. Basta un pulso inicial de luz roja (R) para inducir la germinación. Pero si tras ese pulso se aplica otro de luz roja lejana (RL), se obtienen porcentajes de germinación similares a los de semillas mantenidas en oscuridad. La observación de la sucesión de pulsos (R + RL + R, R + RL + R + RL) permitió descubrir que el color del último pulso aplicado controlaba la germinación.

roja o blanca, debido a la fotolabilidad de la forma activa de la proteína y también a una represión coordinada de la expresión de su gen. En plántulas crecidas en luz y en plantas adultas, los niveles de fitocromo A son muy bajos; de los fitocromos restantes, predomina el B.

El efecto dispar que la luz ejercía sobre la concentración relativa de los fitocromos A-E respaldaba la hipótesis de la singularidad funcional de éstos. Cada fotorreceptor desempeñaba una función propia en la regulación del desarrollo. La fotolabilidad del fitocromo A sugiere que intervendría en las transiciones de oscuridad a luz, como las que ocurren durante la germinación de la semilla bajo tierra o en los ciclos noche-día, mientras que los fitocromos fotoestables participarían en los procesos regulados por luz roja y roja lejana, en las plantas crecidas en luz.

Para obtener pruebas más sólidas de la peculiaridad funcional se inició la búsqueda, identificación y análisis de mutantes carentes de un fitocromo concreto. Se trabajó con *Arabidopsis thaliana*, angiosperma ideal para la experimentación, pues su genoma consta de sólo 100 megabases, desarrolla un ciclo biológico de un mes apenas y alcanza un tamaño pequeño.

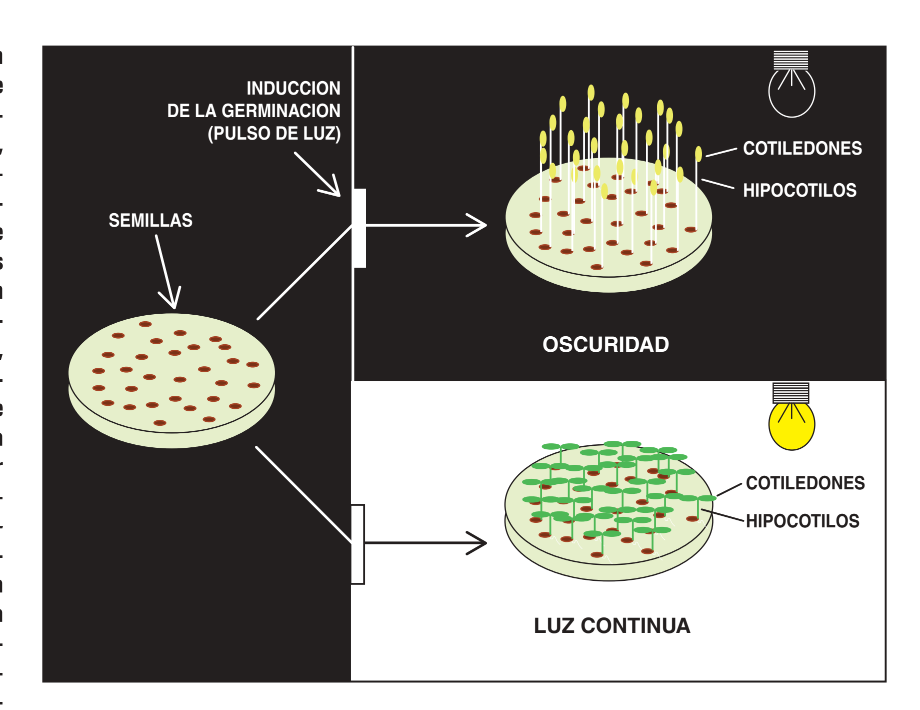
La investigación se centró en la longitud del hipocótilo, un carácter simple y fácil de observar, cuyo alargamiento se inhibe con la luz. Las plántulas mutantes que carecieran de algún fitocromo deberían manifestar una menor respuesta (o hiposensibilidad) a la luz; se las identificaría en seguida por ser más largas que las no mutantes si crecían en un medio de irradiación continua con luz blanca, roja o roja lejana.

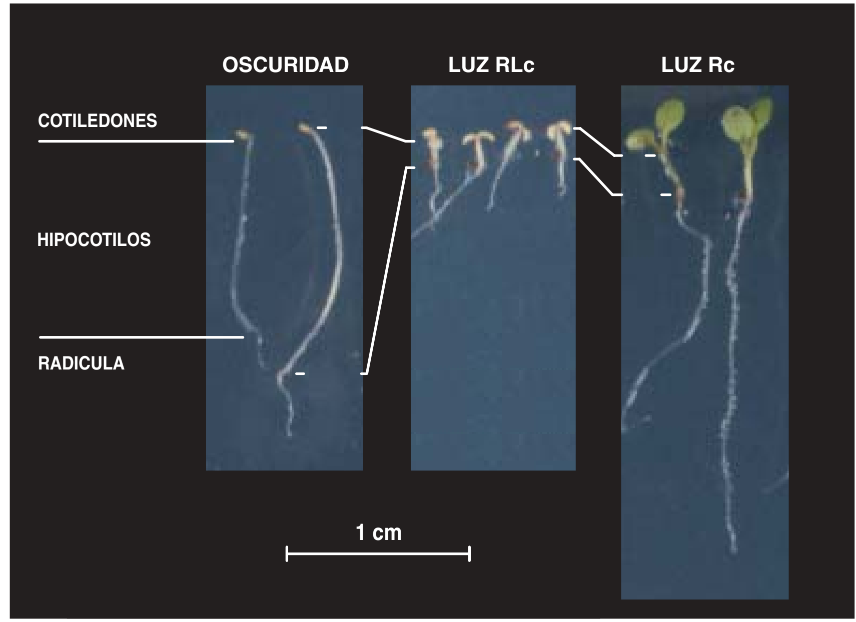
Se identificó un primer mutante que presentaba el hipocótilo alargado en un entorno de luz blanca. Cuando se utilizó luz monocromática, la plántula retenía la respuesta normal bajo luz roja lejana, pero presentaba ceguera a la luz roja. Esa *Arabidopsis* mutante carecía de fitocromo B, por culpa de una mutación bloqueadora del gen subyacente (*PHYB*); se la rotuló *phyB*.

De ello se desprendía que la percepción de luz roja continua por la plántula dependía principalmente del fitocromo B. La ausencia del fotorreceptor afectaba al desarrollo de la planta en diferentes estadios, prueba del papel destacado que desempeñaba en el control de varias respuestas fotomorfogénicas; intervenía, por ejemplo, en la desetiolación, alargamiento del tallo, germinación y control de la floración.

La investigación fisiológica, por otro lado, atribuía al fitocromo fotolábil la inducción de la desetiolación bajo iluminación con luz roja lejana continua. Ahondando en esa línea, se aislaron los primeros mutantes deficientes en fitocromo A, denominados *phyA*. Estos se caracterizaban por su ceguera absoluta a la luz roja lejana continua, mientras seguían respondiendo con normalidad bajo iluminación roja o blanca. Por tanto, la percepción de luz roja lejana correspondía en ex-

6. SI TRAS INDUCIR la germinación con un pulso de luz las semillas se mantienen en oscuridad, las plántulas emergentes se etiolan, es decir, no desarrollan los órganos fotosintéticos, presentan un aspecto amarillento-blanquecino por la ausencia de clorofilas y concentran sus recursos en el crecimiento del hipocótilo en busca de luz. En las plántulas desarrolladas en luz continua, por contra, se inhibe el alargamiento del hipocótilo y se producen la expansión de los cotiledones y el desarrollo de la maquinaria fotosintética para captar la luz. En la parte inferior de la ilustración se muestran plántulas de *Arabidopsis thaliana* desarrolladas en oscuridad y bajo luz continua roja lejana (RLc) y roja (Rc). Aunque la luz roja lejana activa el desarrollo de las plántulas, no induce la síntesis de clorofilas; por eso presentan una coloración similar a la de las plántulas etioladas. A tenor del tratamiento varía la longitud de los hipocótilos.





clusividad al fitocromo A. La investigación ulterior en este mutante ha demostrado que, en condiciones naturales, el fitocromo A contribuye a la supervivencia de las plántulas que germinan bajo una zona de sombra vegetal, en que el ambiente se enriquece en luz roja lejana.

Los cribados bajo luz roja continua en plántulas de *Arabidopsis* no descubrieron mutantes deficientes en los fitocromos C, D y E. Además, las plantas que carecían de los fitocromos A y B seguían reaccionando ante algunos estímulos de la luz roja y roja lejana, especialmente en estado adulto. Parecía clara la regulación de tales respuestas por los fitocromos C, D y E.

Y eso es lo que se confirmó en un ecotipo de *Arabidopsis* denominado Wassilewskija o WS, deficiente en fitocromo D (*phyD*) a causa de una mutación espontánea en el gen correspondiente. Dada la ligera hiposensibilidad a la luz roja de las plántulas mutantes *phyD*, cabe suponer que este fitocromo participa, junto con el B, en la percepción de luz roja. También se han identificado plantas mutantes en el fitocromo E (*phyE*), que muestran, en ausencia de fitocromo B, alteraciones en la percepción de la razón entre luz roja y roja larga.

La complementariedad o redundancia de función observada entre los fitocromos B, D y E les permite, quizás, a las plantas percibir pequeños cambios en las condiciones de luz y ajustar su crecimiento. No se ha obtenido ninguna planta deficiente en fitocromo C, por lo que se desconoce el proceso fisiológico concreto en que interviene.

Tras la percepción de la luz, los fitocromos transforman la información ambiental en una señal celular. Se supone que ésta se transmite a la cadena de transducción iniciada por la función reguladora de los fitocromos. Esta cadena consta, así se cree, de elementos que actúan como mensajeros moleculares desde el fitocromo hasta los genes implicados en los cambios fisiológicos y de desarrollo de adaptación a la luz.

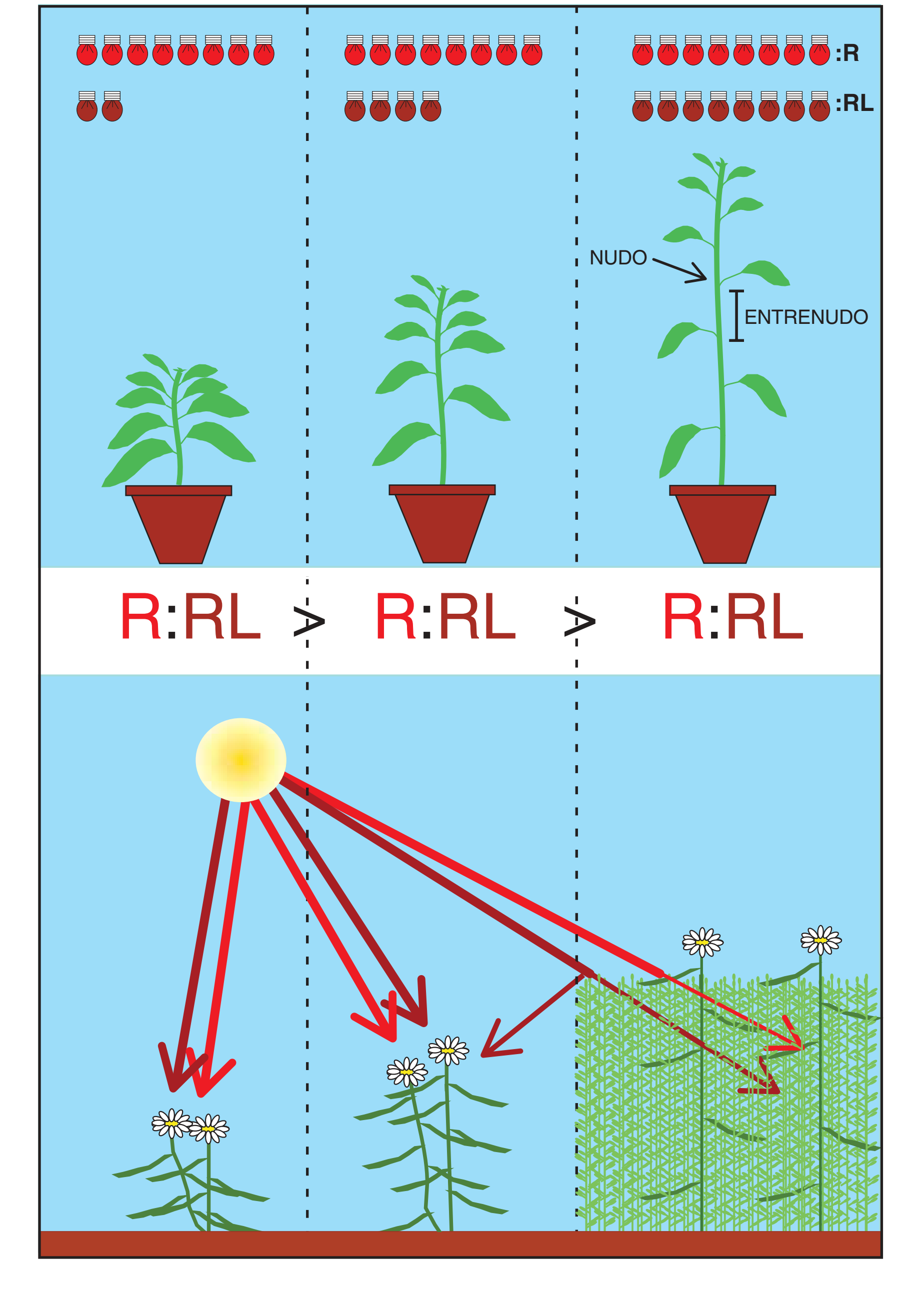
Para abordar la función reguladora de los fitocromos se empezó por comparar su secuencia aminoacídica con la de otras proteínas conocidas. La identificación en el

dominio carboxilo terminal de dos regiones PAS (PAS1 y PAS2) y una región DHQ abría la posibilidad de que los fitocromos fueran quinasas, enzimas preparadas para transmitir la señal a través de la fosforilación de otras proteínas. Se ha comprobado que el fitocromo A tiene actividad quinasa *in vitro*, pero no se ha podido corroborar este proceso *in vivo* ni su relevancia biológica.

Por métodos genéticos se han acotado, además, regiones de las moléculas de fitocromo A y B que participan en la función reguladora. En el caso del fitocromo A se realizaron cribados genéticos de poblaciones mutantes de *Arabidopsis* para aislar los individuos total o parcialmente ciegos a luz roja lejana en los que la función sensora del fitocromo A permanecía inalterada. La secuenciación de los genes del fitocromo en las plantas mutantes descubrió mutaciones puntuales que provocaban cambios en la secuencia de aminoácidos de la proteína. La mayoría de estas mutaciones puntuales se concentraban en la "región núcleo", un segmento del dominio carboxilo terminal que, por tanto, localizaba físicamente la función reguladora.

En el caso de fitocromo B, con idéntica estrategia pero buscando mutantes afectados en la respuesta a luz roja, se identificaron mutaciones puntuales en la misma región. Y se postuló la implicación de la región núcleo en la interacción con un factor que recoge la información del fitocromo e inicia la cadena de transducción de la señal.

Con el fin de descubrir los componentes inmediatos de la cadena de transducción de la señal, es decir, los que interaccionarían directamente con los fitocromos, se recurrió a la técnica del doble híbrido en levadura. Utilizando como anzuelo el extremo carboxilo terminal del fitocromo B, que contenía la región núcleo, se aisló PIF3, un factor que interaccionaba también con el extremo carboxilo terminal del fitocromo A. Se trata de un factor que se une de forma fotorreversible *in vitro* al fitocromo B entero y fotoactivo. Cuando el fitocromo B contiene la región núcleo mutada, la interacción con PIF3 disminuye. Se obtuvieron plantas transgénicas de *Arabidopsis* con niveles reducidos de PIF3 (anti-PIF3). Las plántulas anti-PIF3 son hiposensibles a luz roja y roja lejana, tal como cabe esperar al reducir los niveles de una proteína que interacciona directamente con



7. LA LONGITUD de los entrenudos en plantas adultas está modulada por la acción de los fitocromos. En condiciones de laboratorio (*arriba*), los entrenudos son más largos cuanto menor es la razón entre luz roja (R) y luz roja lejana (RL) en que crecen. Esta respuesta forma parte del "síndrome de huida de la sombra", un mecanismo desarrollado por algunas plantas para competir por la luz. En condiciones naturales (*abajo*), el síndrome se manifiesta en la longitud del tallo de las margaritas que crecen en la cercanía o entre las plantas de un cultivo de gramíneas, en respuesta al enriquecimiento en luz roja lejana que reduce la relación R:RL. Por el contrario, las margaritas que crecen en un espacio abierto, donde es mayor la relación R:RL, no desarrollan este síndrome y presentan entrenudos cortos.

los fitocromos A y B e interviene en la transmisión de la señal que estos receptores inician.

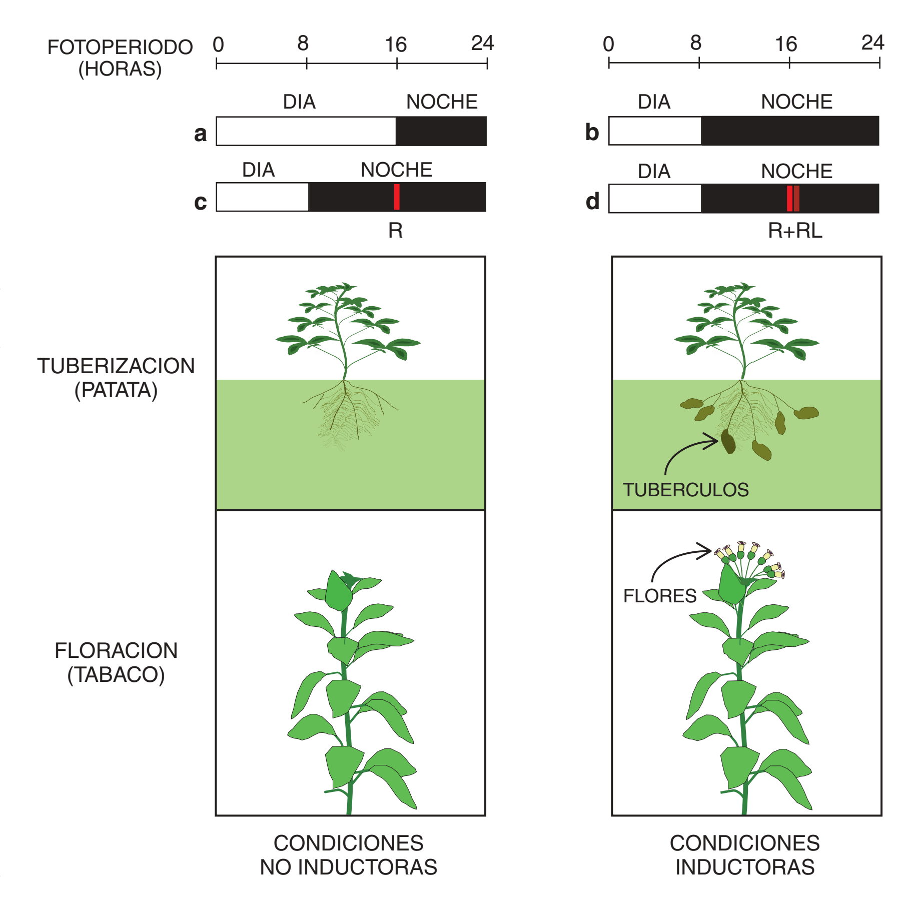
Con posterioridad, y utilizando también la técnica del doble híbrido en levadura, se aislaron dos factores más, PKS1 y NDPK2, que interaccionan con el fitocromo A. PKS1 es una proteína citosólica que se fosforila *in vitro* por fitocromo A. NDPK2 es una quinasa cuya actividad se incrementa cuando se une a la forma activa (Pfr) del fitocromo A. El aislamiento de estos factores que interaccionan directamente con el fitocromo A apoya la hipótesis de que los fitocromos pueden actuar como quinasas *in vivo*.

Para identificar otros posibles componentes de la cadena de transducción de señal se recurrió también a los cribados genéticos, mediante la misma estrategia utilizada para identificar la "región núcleo", pero centrándose en las mutaciones que afectaban a genes distintos del que cifraba la propia molécula fotorreceptora. Se daba por supuesto que en este tipo de mutantes estaba afectado alguno de los pasos de transducción de la señal iniciada por los fitocromos. De los mutantes encontrados en *Arabidopsis* algunos mostraron hiposensibilidad o hipersensibilidad específicamente a la radiación roja, mientras que otros exclusivamente a la luz roja lejana. En ambos casos, los mutantes no presentaron ninguna alteración cuando germinaron en oscuridad, mostrando que el efecto de la mutación alteraba específicamente a la fotopercepción. La obtención de mutantes afectados sólo en la percepción de luz roja lejana o roja corroboraba la existencia de componentes específicos de la transmisión de la señal iniciada por el fitocromo A o la iniciada por el B.

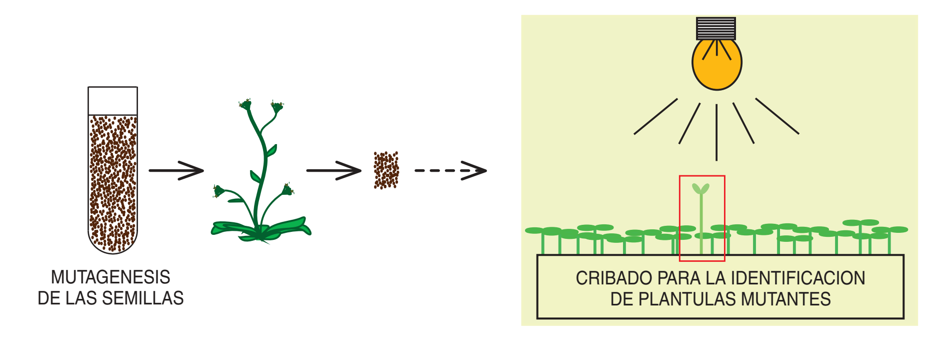
Otros mutantes mostraban hiposensibilidad o hipersensibilidad a la luz roja y roja lejana. O lo que era igual, había otros componentes que eran comunes a las rutas iniciadas por ambos fitocromos. Había un grupo de mutantes en plantas que se desarrollaban en oscuridad como si creciesen en luz. En éstos, la falta de la proteína codificada por el gen mutado iniciaba el desarrollo fotomorfogénico en ausencia del estímulo luminoso. Se aisló, asimismo, un mutante hiposensible a luz continua roja, roja lejana y azul.

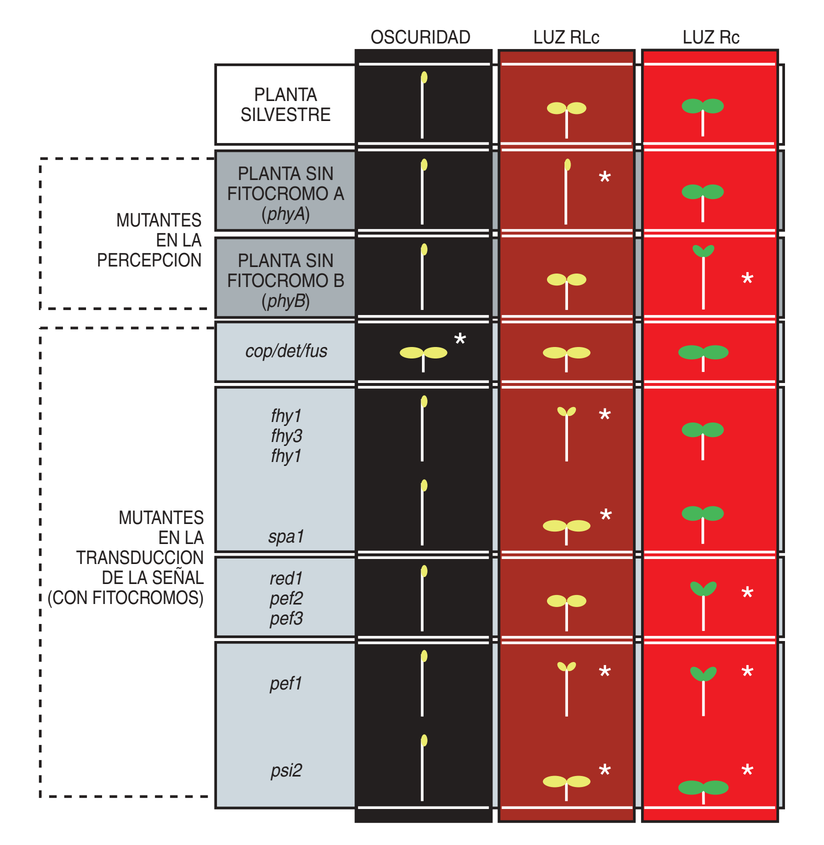
De los componentes identificados por las estrategias genéticas sólo se han aislado los genes de algunos. El gen *PIF3* cifra la proteína PIF3, que pertenece a cierta familia de factores de transcripción. La proteína se aloja en el núcleo de las células vegetales, donde puede unirse a secuencias promotoras concretas del ADN para interaccionar con los fitocromos A y B activos. Este mecanismo permitiría establecerse una conexión directa, rápida y continuada entre la percepción de la luz por la acción de los fitocromos y la regulación de la expresión génica.

La llegada de la señal luminosa al núcleo celular afecta la expresión de ciertos genes. En el caso de la desetiolación de las plántulas, se activa un grupo de genes cuya presencia se requiere en un entorno luminoso, genes que permanecen silentes en oscuridad. ¿De qué modo los fitocromos regulan y coordinan la acción génica? La expresión de un gen viene dictada principalmente por las secuencias de su promotor; a éste se une la maquinaria responsable de la transcripción del ADN en ARNm. Mediante el aná-



8. LAS PLANTAS INICIAN LA FLORACION y la tuberización en la estación del año adecuada gracias a la percepción de cambios en el fotoperíodo o duración día-noche. En ciertas variedades de patata la tuberización depende del fotoperíodo; en días largos (16 horas de luz y ocho de oscuridad) las plantas no tuberizan (*a*) y en días cortos (ocho horas de luz y 16 de oscuridad) desarrollan tubérculos (*b*). En algunas variedades de tabaco la floración sigue un comportamiento similar. Si en fotoperíodos inductores de días cortos la noche se interrumpe con un pulso de luz blanca o roja las plantas no tuberizan ni florecen (*c*). Podemos anular el efecto inhibidor del pulso de luz mediante otro pulso subsiguiente de luz roja lejana (*d*).

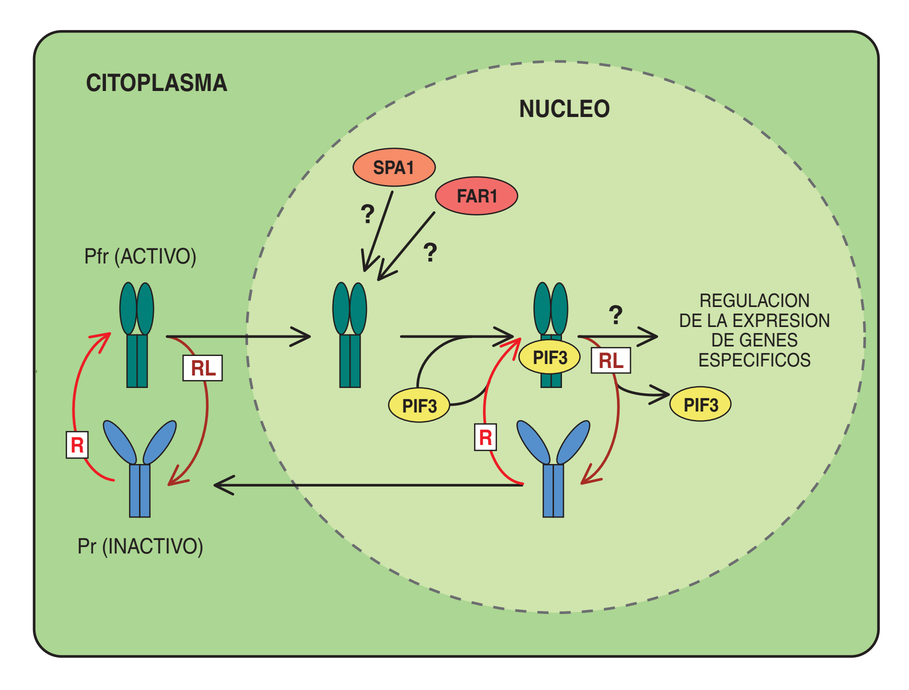




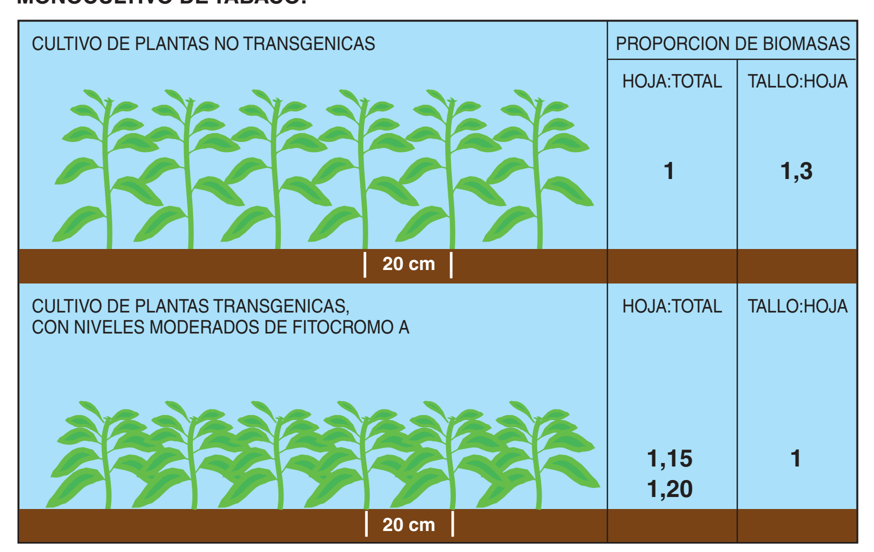
9. PLANTULAS DE *ARABIDOPSIS* mutantes cultivadas bajo luz continua roja (Rc) o roja lejana (RLc). Los mutantes *phyA* y *phyB* carecen de fitocromo A y B, respectivamente. Otros mutantes, en cambio, tienen fitocromos funcionales, por lo que la mutación podría afectar a genes que cifran componentes celulares implicados en la transducción de la señal luminosa. Algunos de estos mutantes se desetiolan en oscuridad (*det|cop|fus*), mientras que otros sólo muestran el efecto de la mutación cuando medran en luz RLc (*fhy1*, *fhy3*, *far1* y *spa1*), Rc (*red1*, *pef2*, y *pef3*) o en ambas (*pef1* y *psi2*).

lisis y comparación de promotores de varios genes regulados por la luz podemos identificar elementos de respuesta a la luz. Tales elementos han aparecido también en otros promotores.

La regulación del desarrollo vegetal por la luz implica cambios en la expresión génica de las células u órganos fotosensibles. En el caso de que los órganos de percepción y los de respuesta no coincidan, se precisa la comunicación entre las diferentes partes de la planta. En la tuberización de la patata y en la floración del tabaco y *Arabidopsis*, la percepción del fotoperíodo ocurre en las hojas, mientras que la respuesta tiene lugar en los estolones (tuberiza-



10. LAS CONDICIONES DE LUZ controlan la ubicación subcelular de los fitocromos y su interacción con PIF3, un posible factor de transcripción. El fitocromo acabado de sintetizar es inactivo (forma Pr) y se aloja en el citoplasma. Si la célula recibe luz roja (R), el fitocromo se convierte en la forma Pfr activa y pasa al núcleo, donde puede unirse a PIF3. Si se irradia con luz roja lejana (RL), el fitocromo Pfr se inactiva y se desprende de PIF3. El complejo formado por Pfr y PIF3 podría regular la expresión génica. Otros componentes de la transducción de la señal lumínica, como SPA1 y FAR1, se instalan también en el núcleo, donde podrían intervenir en el control de la expresión génica.



11. APLICACIONES AGRICOLAS de la investigación en fitocromos. En condiciones de alta densidad vegetal de los monocultivos, la vecindad entre individuos pone en marcha "el síndrome de huida de la sombra", que estimula el alargamiento de los tallos de las plantas en detrimento de la cosecha, las hojas. En esa misma situación, las plantas transgénicas de tabaco que sobreproducen niveles moderados de fitocromo A desarrollan el "enanismo condicionado por la proximidad de otras plantas", que altera la productividad del cultivo. En el monocultivo de plantas transgénicas la proporción de biomasa cosechable aumenta un 15-20 %.

ción) o en los meristemos apicales (floración).

Para explicar la comunicación entre las hojas y los órganos de respuesta al fotoperíodo se apela a determinados factores que se transmiten desde los órganos de percepción hasta los de respuesta. Tales factores podrían ser hormonas. En la tuberización, las condiciones inductoras alteran los niveles de giberelinas en las hojas y en los estolones. En la floración el fotoperíodo desencadenante de la floración provoca cambios en la expresión de genes relacionados con la biosíntesis de estas hormonas: aumentan los niveles de giberelinas activas en las hojas y en el meristemo apical, que estimulan la producción del tallo floral. Las giberelinas podrían operar por tanto como intermediarios endógenos para la integración en la planta de la información ambiental.

En los monocultivos de alta densidad, el "síndrome de huida de la sombra" frena la producción de hojas, frutos y semillas. La cercanía de las plantas en los monocultivos provoca una disminución en la razón entre luz roja y roja lejana percibida a través de los fitocromos fotoestables (B, C, D y E). Esta señal induce el síndrome que, entre otros efectos, estimula el alargamiento de los tallos en detrimento del desarrollo de las hojas.

En las plántulas, la percepción de luz roja lejana por el fitocromo A, fotolábil, ejerce un efecto antagonista al de los fitocromos fotoestables, que comporta la reducción del alargamiento del vástago. Pero el fitocromo A no abunda en la planta adulta, razón por la cual este fotorreceptor deja de controlar el alargamiento del tallo en este estadio. Inconveniente que podría solucionarse con plantas transgénicas que sobreexpresaran el gen del fitocromo A. En el laboratorio de Harry Smith, de la Universidad de Leicester, se consiguieron plantas transgénicas de tabaco que acumulaban cantidades moderadas de fitocromo A. Estas plantas eran más enanas que las normales porque el efecto antagonista de la cantidad extra de fitocromo A enmascaraba el "síndrome de huida de la sombra". Se producía el "enanismo condicionado por la proximidad de otras plantas".

En las condiciones de alta densidad vegetal propias de los monocultivos, el "enanismo condicionado por la proximidad de otras plantas", aunque no aumenta la cantidad total de biomasa producida, sí incrementa la proporción de biomasa cosechable (las hojas en el caso del tabaco) entre un 15 y un 20 % en relación a los monocultivos de plantas no modificadas genéticamente.

En el laboratorio de Christiane Gatz, de la Universidad de Göttingen, se ha observado que la sobreexpresión de fitocromo B de *Arabidopsis* en patata provoca, junto a otros efectos, un mayor rendimiento fotosintético, con el consiguiente incremento en la producción de tubérculos, al menos en condiciones de laboratorio. Estos resultados prometedores indican que el entendimiento de la fisiología de los fitocromos puede ayudar a mejorar sustancialmente la productividad agrícola.

Bibliografía complementaria

PHOTOMORPHOGENESIS IN PLANTS. Dirigido por R. E. Kendrick y G. H. M. Kronenberg (segunda edición). Kluwer Academic Publishers; 1994.

GENETIC ENGINEERING OF HARVEST INDEX IN TOBACCO TROUGH OVEREXPRESSION OF A PHYTOCHROME GENE. P. R. H. Robson, A. McCormac, A. S. Irvine y H. Smith, en *Nature Biotechnology*, vol. 14, págs. 995-998; 1996.

NUCLEAR AND CYTOSOLIC EVENTS OF LIGHT-INDUCED, PHYTOCHROME-REGULATED SIGNALING IN HIGHER PLANTS. F. Nagy y E. Schäfer en *EMBO Journal*, vol. 19, págs. 157-163; 2000.

LIGHT: AN INDICATOR OF TIME AND PLACE. M. M. Neff, C. Fankhauser y J. Chory en *Genes and Development*, vol. 14, págs. 257-271; 2000.

PERFILES

Sarah Simpson

SUSAN SOLOMON: El legado de Scott

Cierto día de 1986 Susan Solomon, química de la atmósfera, conoció en su cuerpo la hostilidad sin cuartel del continente austral. La temperatura había caído a unos peligrosos 45 grados bajo cero; la sensación térmica debida al viento era de –75. Solomon estaba de visita en la Antártida para estudiar trazas de gases en la atmósfera. Pero la experiencia también dio comienzo a una investigación de 15 años en la trágica expedición de Robert Falcon Scott, el explorador inglés que pereció en la nieve en 1912 tras perder —por muy poco— la carrera al polo Sur.

Las conclusiones históricas de Solomon han quedado plasmadas en *The Coldest March: Scott's Fatal Antarctic Expedition*, publicado el pasado mes de septiembre por la Universidad de Yale. El libro ofrece una convincente explicación inédita sobre lo que acabó con Scott y cuatro de sus hombres. No fue la incompetencia del explorador, como sugería la creencia extendida. Fue el frío letal, más riguroso que el sufrido por Solomon en McMurdo. Su análisis de los registros meteorológicos —y una cuidadosa lectura de los diarios de la expedición— muestran que las descripciones de Scott, que lo pintaban como un líder sin sustancia y falto de preparación, estaban erradas. "Es un caso en el que la ciencia informa a la historia", asegura. El equipo de la expedición polar murió durante el mes de marzo más frío nunca registrado, con temperaturas que descendieron hasta –60 ºC.



1. A Susan Solomon, precursora en el estudio del ozono atmosférico, la inquietud científica le viene de lejos. "Tenía 10 años cuando Jacques Cousteau me enseñó que la ciencia era algo divertido"

Como directora del equipo de investigación que confirmó la existencia del agujero de ozono en la Antártida, Solomon, que ha cumplido 45 años, estaba acostumbrada a contemplar el mundo de manera diferente. Examinar la expedición de Scott se convirtió en su pasatiempo mientras llevaba a cabo los estudios que vincularon definitivamente los clorofluorocarburos (CFC) fabricados por el hombre a la destrucción del ozono en la estratosfera y convirtieron el agujero de ozono en uno de los temas ambientales más divulgados del siglo XX.

El año anterior a su glacial paseo de 1986, Solomon ya estaba pensando en el ozono. Siendo investigadora del Laboratorio de Aeronomía en Boulder, de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera, postuló que las nubes heladas en el corazón de la capa de ozono estratosférica (a unos 20 kilómetros por encima de la superficie del planeta) proporcionan las condiciones que activan el cloro de los CFC. Los átomos de cloro desprendidos se llevan átomos de oxígeno del ozono (una molécula de tres átomos de oxígeno). Conforme se destruye el ozono, la Tierra pierde gran parte de su protección contra la perjudicial radiación ultravioleta, que puede provocar cáncer de piel y dañar las cosechas.

Múltiples mediciones de la expedición antártica del ozono dirigida por Solomon en 1986 y de otra en 1987 confirmaron la teo-

ría. De ahí a la predicción acertada de la depauperación del ozono con el tiempo en latitudes medias sólo había un paso. Ese trabajo le valió su elección a la Academia Nacional de Ciencias en 1993 y la Medalla Nacional de la Ciencia hace dos años.

Mientras denunciaba los CFC y exploraba otros aspectos de la atmósfera terrestre, la expedición de Scott comenzó a interesarle más. Tras 12 años de mirar de reojo los diarios de Scott y algunos de sus compañeros, se dijo que "sería curioso ver cuáles eran los datos meteorológicos. Y fue entonces cuando sentí otra suerte de respeto por ellos". Empezó a encontrar pruebas de que fue el mal tiempo, y no la deficiente preparación, el factor determinante de la muerte de Scott.

Efectivamente, Solomon descubrió que el grupo de Scott sufrió tres reveses fatales de las condiciones climáticas al cruzar la banquisa de Ross, el último tramo de su viaje de vuelta desde el polo. Esa travesía de 640 kilómetros debería haber sido la parte más fácil de su itinerario. Por excursiones anteriores y las predicciones del tiempo, esperaban que el viento soplara de espalda. El meteorólogo de la expedición, George C. Simpson, también predijo temperaturas de entre –20 y –30 ºC (relativamente suaves) en la banquisa. Empero, el grupo se encontró unas temperaturas mínimas diarias de –37 ºC, y sólo un día de las tres semanas que pasaron en la banquisa subió la temperatura de –30 ºC.

"Simpson pensaba que las posibilidades de un tiempo así eran de una entre 10", me explica. Su análisis de 15 años de mediciones meteorológicas tomadas con modernas estaciones meteorológicas automáticas cerca del histórico camino de Scott corroboran las predicciones de Simpson. Sólo uno de esos años, 1988, arrojó temperaturas tan heladas en el mes de marzo.

Además del zarpazo del frío, la insólita calma del viento hizo inútiles las velas que Scott esperaba utilizar para mover los trineos de provisiones. Cada hombre hubo de arrastrar un trineo de 80 kilos sobre una nieve que presentaba la textura de la arena gruesa del desierto. Utilizando de nuevo recursos de la ciencia moderna, Solomon resuelve por qué la nieve adquirió esa forma peculiar: a temperaturas inferiores a los 30 grados bajo cero, la fricción ya no derrite la nieve formando una capa resbaladiza bajo los patines de los trineos. Estas tres circunstancias se combinaron con una tormenta especialmente larga y un pie helado que acabó por mermar la capacidad de Scott para caminar. El y sus dos últimos compañeros supervivientes murieron en una tienda a sólo 18 kilómetros de una provisión de alimentos y combustible.



2. Robert Falcon Scott y cuatro camaradas sucumbieron frente al extremo clima antártico en su viaje de regreso del polo Sur en 1912

Solomon trabajó por las noches y en los fines de semana durante más de tres años para tejer estos y otros hallazgos en *The Coldest March*. "Literalmente lo fui destilando, pues me acompañó durante mucho tiempo", confiesa. A su grupo de aficionados a los relatos de fantasía científica (integrado por un granjero, el contable de un almacén de bebidas y un constructor, con los que se reúne todos los martes desde hace 12 años) le concede el mérito de haber redactado un texto científico accesible al público.

Contenta de seguir con su trabajo diurno en el Laboratorio de Aeronomía al tiempo que escribía el libro, Solomon firmó una recensión de 41 páginas sobre la historia de la investigación del ozono y voló en aviones de investigación para estudiar cómo absorben las nubes la luz solar, fenómeno que ejerce una influencia crucial en el equilibrio energético de la Tierra. La dolorosa pérdida de un amigo muy querido y compañero en la investigación del ozono que se estrelló con un avión particular en 1999 la espoleó durante los últimos meses de escritura.

"En algunos aspectos, para ella es una cuestión de principios hacer frente a la adversidad —dice Barry Sidwell, su marido desde hace 12 años—. No hay quien la desvíe cuando se propone algo."

Lo mismo en ciencia que en historia, a Solomon le empuja su deseo de llevar su mensaje a una audiencia amplia. "Uno de los defectos de los científicos es que no siempre nos comunicamos bien fuera de nuestros círculos. Cuando uno se encuentra algo nuevo o interesante, me parece que es un deber trasladarlo al público."

La cartografía cromosómica

Una exploración evolutiva por el genoma de Drosophila buzzatii

La moderna teoría evolutiva está basada en el *dictum* darwinista de "descendencia con modificación". Esto significa que, en cada etapa de la historia de la vida, las especies son descendientes modificados de otras especies ancestrales. Para Darwin el conductor de estas modificaciones es la selección natural, definida, de un modo sintético, como la supervivencia de los más aptos.

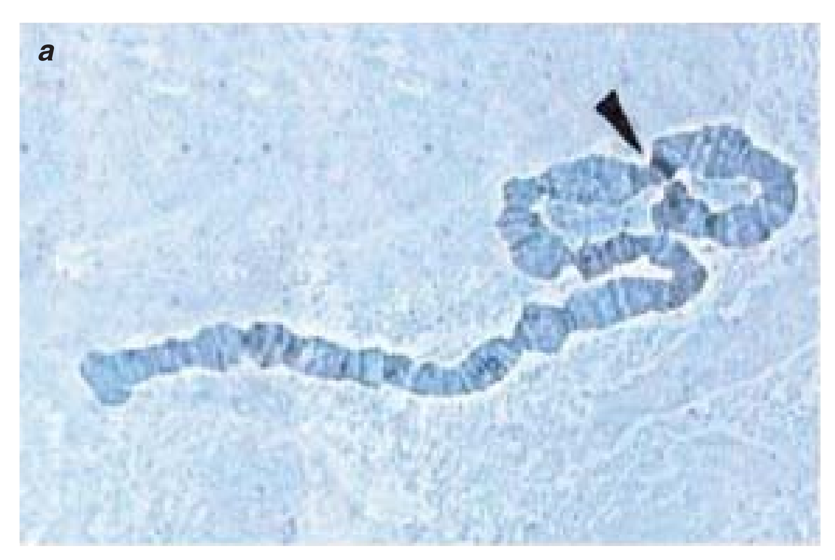
Pero siendo la evolución un proceso histórico, contiene en sí misma una dosis significativa de contingencia, entendiendo por tal la imposibilidad de predecir la estructura exacta de dichas modificaciones. El cambio evolutivo es, por tanto, el resultado de la elección de la estructura más apta entre el conjunto de estructuras *disponibles* en cada momento histórico.

Dado que la estructura es función de la información genética acumulada en el genoma, es lógico que la comparación entre genomas sirva para reconstruir la historia evolutiva.

Mediante el estudio de los genomas no sólo detectamos diferencias sino también semejanzas que nos permiten inferir el origen común de muchas especies, e incluso improntas comunes que, como el código genético, datan del origen de la vida. Sin embargo, no es fácil distinguir si estas semejanzas resultan de procesos contingentes o selectivos, por lo que reconstruir la historia evolutiva comparando genomas, aunque es una empresa necesaria, no es sinónimo de entender el porqué y el cómo ésta ha ocurrido. La genética es el constructor que, aun estando sujeto a las reglas constructivas del desarrollo, produce la variabilidad seleccionable, pero es la ecología, también con sus reglas, la que decide en último extremo quién sigue adelante y quién no en el proceso de selección natural.

Penetrar en los entresijos de la evolución requiere, por tanto, una síntesis genético-ecológica y la elección de especies, abordables en ambos aspectos, que sirvan de modelo. Varias son las razones que hacen de *Drosophila buzzatii* una de estas especies. Por un lado, disponemos ya del genoma casi completo de otra especie relativamente próxima, la famosa mosca del vinagre *D. melanogaster*. Esto nos permite realizar comparaciones interesantes entre ambos genomas. Por otro lado, varios grupos de trabajo hemos utilizado a *D. buzzatii* en estudios de genética ecológica y especiación durante los últimos 25 años. Sabemos que es originaria de las zonas semiáridas del noroeste argentino y que ha colonizado en tiempos históricos diversas regiones climáticas similares, entre ellas la cuenca mediterránea, siguiendo a la chumbera (género *Opuntia*), su cactus hospedador.

Hasta ahora, la riqueza acumulada de conocimientos ecológicos y poblacionales contrastaba con la escasez de marcadores genéticos moleculares que nos permitieran una primera aproximación al genoma de *D. buzzatii*. Una publicación reciente de nuestro grupo





Cromosoma 2 de Drosophila buzzatii (a). *La punta de flecha indica la localización mediante hibridación* in situ *de un marcador genético RAPD. Macho de esta especie* (b).

ha llenado parte de este vacío al aportar la primera cartografía física exhaustiva de su genoma. Obtener un mapa físico consiste en ubicar en el genoma determinadas secuencias de ADN que nos sirven de mojones o balizas para poder desplazarnos hasta localizar genes o secuencias de interés. Esta labor de balizado es un paso previo a la secuenciación completa del ADN, que sería el mapa físico final.

Nosotros hemos utilizado secuencias polimórficas de ADN obtenidas mediante amplificación por reacción en cadena de polimerasa con cebadores aleatorios, denominadas RAPD (del inglés Random Amplified Polymorphic DNA). La posición de estas secuencias marcadoras en los cromosomas politénicos de *D. buzzatii* se determinó empleando la técnica de hibridación *in situ*. El mapa obtenido consta de 73 RAPD de copia única distribuidos por todos los cromosomas, con una longitud media de 942 pares de bases (pb) por marcador.

La distribución de secuencias polimórficas no es uniforme en el genoma, pues la mayoría de ellas se alojan en los cromosomas 2 y 4. Tampoco la distribución es uniforme a lo largo de los cromosomas, con agrupamientos significativos en determinadas zonas. Esto sugiere que los niveles de variación genética no parecen estar distribuidos al azar en el genoma de la especie. Además, tenemos razones para pensar que la densidad de genes es mayor en el cromosoma 2.

¿Cuál es la relevancia de estos resultados? La secuenciación de estos marcadores nos permite compararlos con todas las secuencias depositadas en los bancos de datos y especialmente con las del genoma de *D. melanogaster* y encontrar similitudes con genes conocidos o detectar genes aún no descritos. Esto nos facilita la posterior localización de genes o factores responsables de la variación genética sobre la que pudiera actuar la selección natural en el contexto ecológico de *D. buzzatii*.

Otro tipo de estudio consiste en utilizar dichos marcadores para detectar factores de aislamiento reproductivo, por inviabilidad y esterilidad híbrida, que intervienen en la formación de nuevas especies.

En resumen, el primer borrador del mapa físico de *D. buzzatii* nos permitirá explorar procesos evolutivos no sólo a través de la comparación de genomas, sino también al nivel de cambios graduales que ocurren en las poblaciones, cumpliendo así con el doble fin de entender simultáneamente los dos sucesos evolutivos básicos: la descendencia (la historia) y la modificación (la selección).

ANTONIO FONTDEVILA
HAFID LAAYOUNI
y MAURO SANTOS
Grupo de Biología Evolutiva,
Departamento de Genética
y Microbiología
Universidad Autónoma
de Barcelona

Plantas medicinales

El cólquico

El cólquico o cólchico (*Colchicum autumnale* L.) es una planta medicinal de larga tradición. La industria farmacéutica sigue rentabilizando sus alcaloides, sobre todo, la colchicina y el colchicósido. De ambos, la primera presenta actividad antimitótica y anticancerígena; se aplica en el tratamiento del ataque agudo de gota. El colchicósido sirve de base para la obtención del tiocolchicósido, que actúa como relajante muscular.

De otras plantas de la misma familia de las colquicáceas se han aislado numerosos alcaloides del tipo tropolónico, compuestos que en el caso del cólquico aparecen, sin embargo, en bajas concentraciones. Dado que la síntesis química de los alcaloides en cuestión resulta poco rentable, la colchicina y el colchicósido deben extraerse de la fuente natural que los produce, fundamentalmente del cólquico y, en menor medida, de plantas de los géneros *Gloriosa* e *Iphigenia*, pertenecientes a la misma familia botánica.

R_1O — MeO — MeO — NHCOMe — O — R_2

Colchicina: $R_1 = Me$, $R_2 = OMe$
Colchicósido: $R_1 = C_6H_{11}O_5$, $R_2 = OMe$
Tiocolchicósido: $R_1 = C_6H_{11}O_5$, $R_2 = SMe$

1. Principales alcaloides de interés terapéutico presentes en Colchicum autumnale

La distribución geográfica de *Colchicum autumnale* L., originario de la zona caucásica próxima al mar Negro, abarca Europa central, Gran Bretaña, Francia, España e Italia. Medra en prados húmedos o semihúmedos de media montaña, aunque lo encontramos también en los valles bajos y en zonas de alta montaña. Esta planta, tóxica para los herbívoros, se incluyó durante mucho tiempo entre las malas hierbas dañinas, hasta que se aislaron sus principios activos en el siglo XIX.

El cólquico es una planta herbácea, geófita y bulbosa, que posee un cormo como órgano de reserva. Se caracteriza por una biología muy particular. Su ciclo ontogénico está invertido, pues florece entre los meses de agosto y octubre (de ahí su epíteto de *autumnale*), para fructificar en primavera. Las flores, que pueden presentarse solitarias o bien en grupos, son de color rosa o tonalidad violácea, nacen directamente del cormo y mantienen el ovario subterráneo en el momento de la floración. En otoño se produce, pues, la autofecundación; los granos de polen descienden desde los estambres hasta los óvulos, que quedan en un nivel por debajo del suelo.

Posteriormente, las flores se marchitan. En la primavera siguiente emergen las hojas (que pueden alcanzar hasta 60 cm de largo por 5 cm de ancho), y con ellas las cápsulas de las semillas, escondidas bajo tierra durante el período invernal. En primavera, las hojas



2. Aspecto de la planta de cólquico durante la fase de floración



3. Planta de Colchicum autumnale *en estado vegetativo. Pueden apreciarse las cápsulas que contienen las semillas*

realizan la fotosíntesis y acumulan reservas en el nuevo cormo hijo (que excepcionalmente pueden ser dos). Las hojas se marchitan con los calores estivales; la planta inicia entonces una nueva fase de descanso hasta el otoño, momento en que volverá a florecer.

El porcentaje de germinación de las semillas es prácticamente nulo (según ensayos realizados en diferentes laboratorios). Además, el período desde la germinación de las semillas hasta que la planta es capaz de florecer y, por consiguiente, de formar nuevas semillas, abarca unos cinco años.

La multiplicación vegetativa del cólquico es muy lenta. Cada año el cormo madre se desintegra después de la floración para dar lugar al nuevo cormo hijo. Resulta, pues, casi imposible conocer la edad de una planta. Como lo es también obtener plántulas a partir de las semillas, dada la baja tasa de germinación. Por eso las poblaciones naturales de cólquico suelen permanecer estáticas, con riesgo de extinción tras el avance de la mecanización agrícola de las zonas rurales donde crece espontánea.

De los estudios sobre cultivo *in vitro* del cólquico y el desarrollo de métodos de micropropagación se han cosechado resultados prometedores. Se pretende ahora optimizar estos procesos de multiplicación, seleccionar los especímenes y lograr un material aséptico, listo para su cultivo en campo, y productivo de alcaloides.

Si bien los alcaloides del cólquico se distribuyen por toda la planta, la colchicina y el colchicósido se acumulan preferentemente en las semillas, donde se alcanzan valores comprendidos entre 0,20 y 1,20 % de colchicina, referido a peso seco. Se registra, además, una amplia variabilidad genética en el contenido de principios activos, no sólo de una población a otra, sino también dentro de una misma población. La variación de los niveles de alcaloides de un año a otro se atribuye al régimen de lluvias y al rigor térmico invernal.

No se ha conseguido todavía la puesta a punto de un cultivo del cólquico. De momento, tampoco resulta rentable la recolección *in situ* de semillas de poblaciones naturales. Sólo los prados con una gran densidad de cólquico pueden animar a los agricultores a mantener una especie de comprobado interés farmacéutico.

CARLES CODINA, JAUME BASTIDA y FRANCESC VILADOMAT
Depto. de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología, Facultad de Farmacia, Barcelona

Excitación e inhibición nerviosas

A coro

Cada célula nerviosa del cerebro recibe una lluvia constante de pulsos eléctricos, o espigas, enviadas por miles de otras neuronas. Las espigas de entrada pueden excitar o inhibir a la neurona receptora, es decir, aumentar o disminuir la probabilidad de que ésta, a su vez, dispare una espiga.

Podemos imaginarnos la neurona como un elemento de computación. Va contando el número neto de espigas excitadoras que ha recibido en los últimos T milisegundos, donde T es el tiempo de integración, del orden de 10 a 100 milisegundos. Se producirá una espiga de salida si el cálculo rebasa cierto umbral. Importa aquí la cifra de espigas entrantes; carece, sin embargo, de interés el patrón u orden temporal en escalas de tiempo inferiores a T.

Pero se trata de un modelo que peca de simplificación excesiva. En principio, los intervalos de tiempo entre espigas podrían utilizarse para transmitir mucha más información. La sincronía constituye una forma específica de patrón temporal que surge cuando ciertos pares de neuronas tienden a disparar sus espigas al unísono (con menos de 10 milisegundos de diferencia), como si mandaran sus mensajes a coro.

Según varios autores, la sincronía podría intervenir en el procesamiento de información de la corteza cerebral. Para unos, el coro aumentaría la intensidad de un mensaje. Para otros, la presencia de un coro revelaría la existencia de un mensaje distinto, adicional. Tales hipótesis, defendidas en debates acalorados, no se han visto acompañadas de respaldo experimental suficiente.

Está demostrado que las neuronas pueden sincronizarse. La sincronía entre dos neuronas aumenta en función del número de entradas que tienen en común. Pero, ¿se modifica la sincronía con los cambios cognitivos?

Recientemente, el grupo encabezado por P. N. Steinmetz, de la

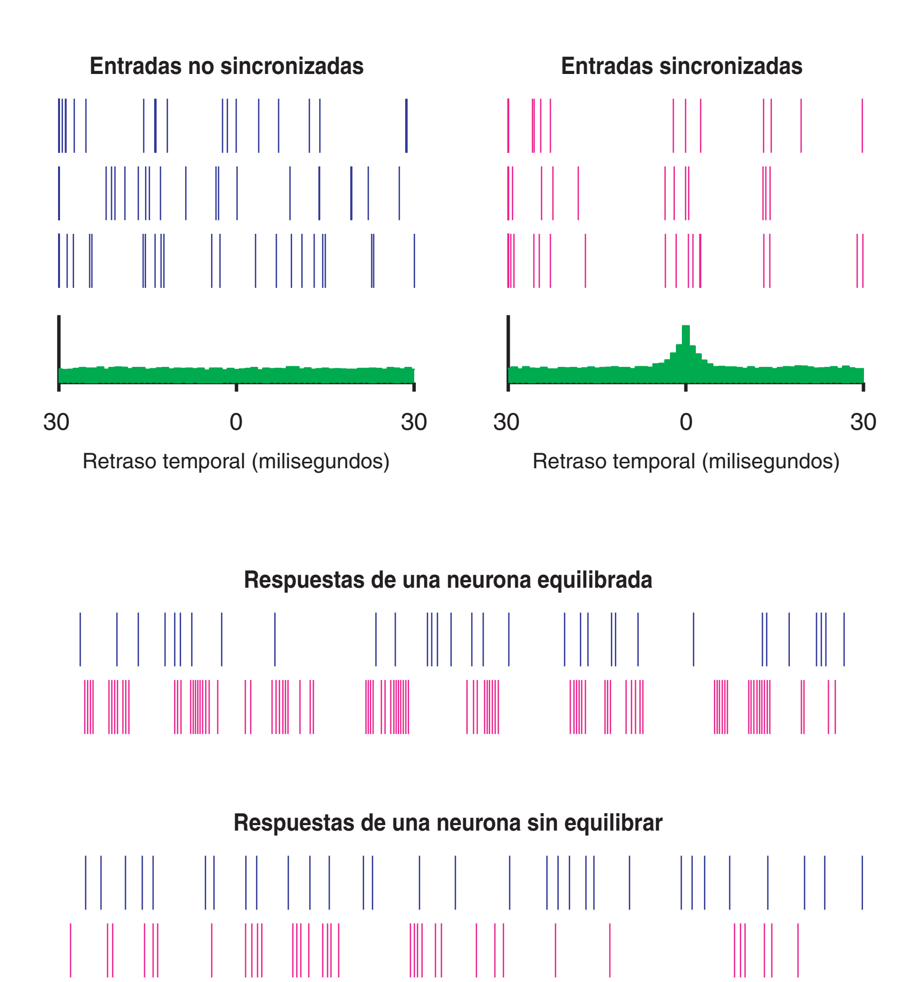
Universidad Johns Hopkins, informó de cambios de sincronía asociados a cambios de atención. Registraron simultáneamente la actividad de pares de neuronas de la corteza somatosensorial secundaria (S2), un área del cerebro que responde al tacto.

Trabajaron con monos despiertos. El dispositivo experimental constaba de una consola con dos botones, dos estímulos táctiles y otros dos estímulos visuales presentados en una pantalla. Los simios debían indicar, oprimiendo uno de los dos botones, si los dos estímulos táctiles presentados consecutivamente sobre las puntas de los dedos eran o no iguales. Asimismo, sirviéndose de los botones, debían ratificar si los dos estímulos visuales presentados en la pantalla eran o no iguales. En todos los ensayos se ofrecieron estímulos táctiles y visuales; una señal independiente le indicaba al mono qué tarea tenía que ejecutar. En conjunto, pues, los estímulos sensoriales y los movimientos de respuesta eran los mismos en las dos tareas, pero el foco de atención cambiaba.

Steinmetz y su grupo hallaron que las tasas de disparo de las neuronas de S2 variaban notablemente de una tarea a otra, tendiendo a ser más altas cuando el animal atendía al estímulo táctil; se trataba de un fenómeno ya observado. Pero, y en ello estribaba la novedad, observaron que algunos de los pares aumentaban su sincronía cuando la atención se dirigía al estímulo táctil. La diferencia en sincronía con respecto a la tarea visual era mayor cuando resultaba más difícil la tarea táctil. De todo ello se desprendía que la sincronía entre espigas guardaba relación con el cambio en el foco de atención.

Uno se inclina a pensar que quizás un aumento de la sincronía podría intensificar el procesamiento de información de las neuronas que reciben las señales provenientes de S2. Y de nuevo surge la pregunta: ¿para qué sirve un coro de espigas?

No existe de momento una respuesta tajante. En teoría, una mayor sincronía podría traducirse en una mayor intensidad de la respuesta, pero esto depende de varias propiedades de los microcircuitos corticales que no se conocen con precisión (*véase la figura*). Por otro lado, la atención afecta también a las tasas de disparo; lo ideal sería manipular experimentalmente la sincronía sin alterar las tasas de disparo, pero no se sabe si ello es posible. Queda mucho trabajo experimental y teórico que realizar antes de poder determinar la importancia de la sincronía y otros patrones temporales entre señales nerviosas para el funcionamiento normal del cerebro.



Impacto de la sincronía nerviosa. Las gráficas superiores muestran trenes de espigas (pulsos eléctricos) de tres neuronas. Cuando las espigas no se hallan sincronizadas, el momento de disparo de una neurona es independiente de los instantes de disparo de las otras; el histograma de correlación (en verde) *es plano. Esta función muestra la probabilidad de que una neurona dispare* x *milisegundos antes o después que otra;* x *es el retraso temporal. Cuando las espigas aparecen sincronizadas, la correlación muestra un pico y las neuronas tienden a disparar simultáneamente con mayor frecuencia. Las gráficas inferiores revelan las respuestas de una neurona que recibe entradas excitadoras independientes* (espigas azules) *o sincronizadas* (espigas magenta). *Cuando las entradas inhibidoras igualan a las excitadoras, la neurona está equilibrada. En este régimen la sincronía aumenta el número y la variabilidad de las espigas de salida. Si la neurona no está equilibrada, la sincronía afecta principalmente a la variabilidad de la salida, pero no a la tasa de disparo*

EMILIO SALINAS
Laboratorio de neurobiología computacional,
Instituto Howard Hughes de Investigaciones Médicas
Instituto Salk

Reconocimiento del habla

Interfases de usuario inteligentes

El hombre necesita comunicarse con las máquinas de su entorno. La mayoría de las veces, esta comunicación se funda en un lenguaje más cercano a la máquina que al propio usuario, quien tiene que aprender a "interactuar" con la misma, adaptándose a su interfase.

Hoy, el mundo de las interfases hombre-máquina evoluciona a un ritmo sorprendente, con la proliferación consiguiente de neologismos que responden a nuevos conceptos: "ergonomía", "interfases multimedia", "interfases inteligentes" y muchos otros. Imaginemos un ordenador controlado mediante la propia voz del usuario, con expresiones naturales, espontáneas, y capaz de mantener un diálogo; o pensemos en un entorno doméstico o domótico donde el televisor, los electrodomésticos, la iluminación y las ventanas se controlen mediante el habla; o en el manejo de instrumental en un automóvil, el control e interacción con un robot, sistemas de información y reserva de billetes en medios de transporte públicos a través del teléfono que interaccionen mediante el habla con el usuario, navegación en Internet mediante el habla en varios idiomas, puntos de información multimedia que dialoguen con el usuario, telecompra mediante el habla utilizando el teléfono, etc. Muchas de estas aplicaciones son ya una realidad en los centros de investigación y no pasarán muchos años antes de verlas instaladas en escenarios reales.

Por la interfase de usuario inteligente se facilita el diálogo hombre-máquina en un lenguaje cercano al habla natural. Pero, ¿podemos hablar a una máquina que nos entienda? Sí, siempre que se cumplan ciertas condiciones. La máquina no tiene cerebro. Hay que capacitarla para "comprender" en dominios restringidos. La máquina no entenderá cualquier cosa que le digamos, sino sólo el tipo de interacciones que pertenezcan al dominio que se haya modelado. El modelado de un dominio no es tarea fácil. Existen multitud de ellos para representar el conocimiento semántico asociado a una frase proferida en lenguaje natural.

A tenor de la arquitectura y los modelos y técnicas utilizadas varían los procesos que tienen lugar en la obtención del significado implícito en una frase hablada en lenguaje natural. Los procesos comunes que suelen aparecer en los sistemas son el análisis acústico, morfo-sintático, semántico y pragmático.

El equipo de investigadores del Grupo de Tecnología del Habla, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, ha diseñado y realizado una interfase avanzada de usuario para castellano. La finalidad de la misma es permitir crear interfases de usuario en dominios semánticos restringidos, donde el usuario interaccione con el sistema o aplicación mediante expresiones habladas en lenguaje natural.

La interfase está formada por un módulo general, que posee una arquitectura independiente de la aplicación, y un módulo dependiente, que incluye los elementos necesarios para realizar el propósito de cada aplicación.

El módulo general tiene la función de "comprender" la frase hablada de entrada, que el micrófono capta y luego se digitaliza y procesa para extraer de ella una secuencia de parámetros que representan la información espectral más importante de la misma. El reconocedor de habla procesa esta secuencia de parámetros mediante técnicas de comparación dinámica de patrones estadísticos (modelos ocultos de Markov), ayudándose de alguna gramática morfo-sintáctica probabilística (pares de categorías sintácticas como sustantivo, verbo, conjunción, adjetivo, etc.). El resultado de este proceso es una o varias secuencias de palabras, las que el reconocedor decide que están contenidas en la frase hablada de entrada.

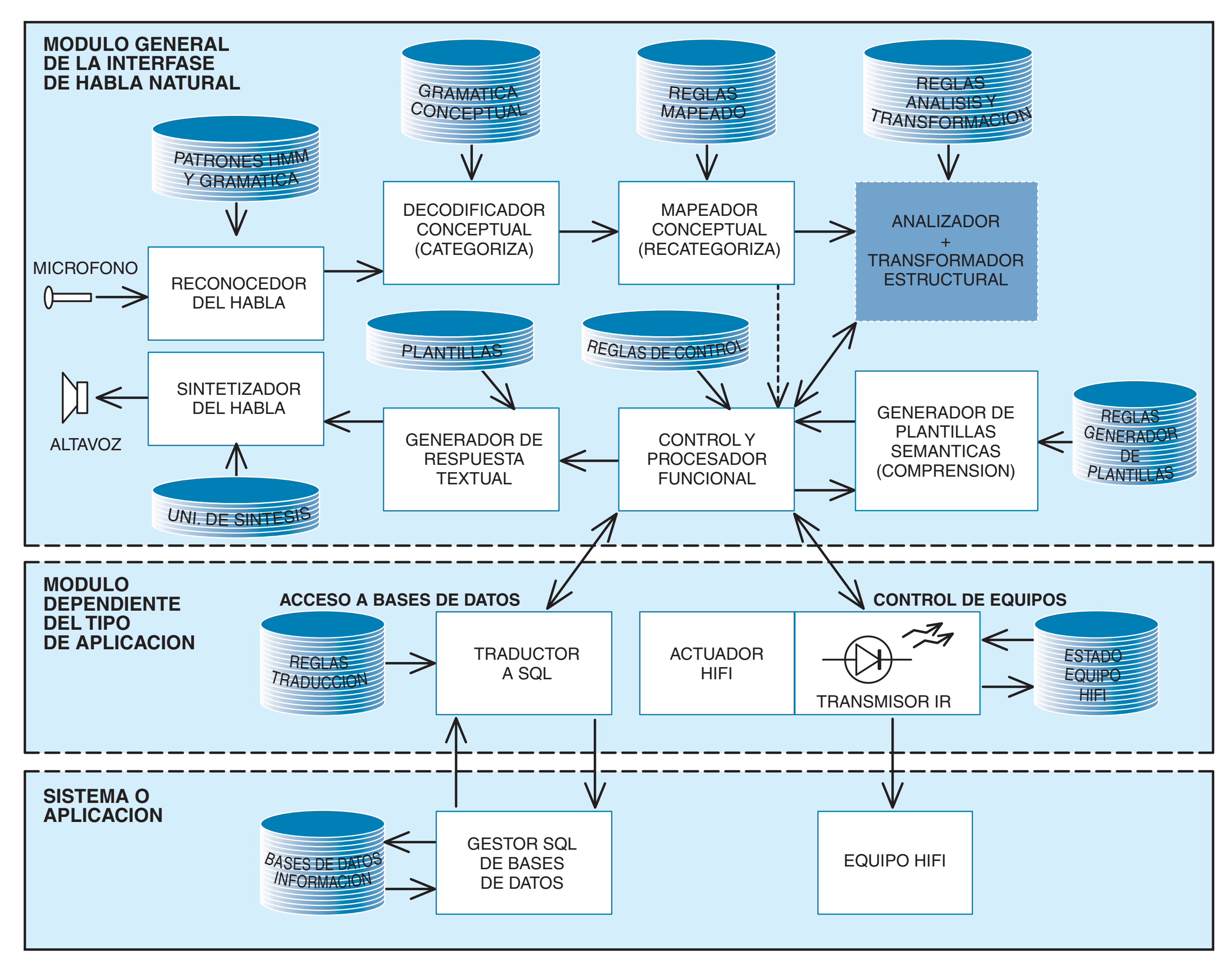
Esa secuencia de palabras contiene errores (el reconocedor inserta palabras, borra otras o sustituye unas por otras). De la secuencia de palabras con errores debe extraerse el "significado" de la frase de entrada e interpretarlo, es decir, actuar en función del mismo. Actuación que dependerá del tipo de aplicación con la que se desee interaccionar (acceso a bases de datos con información, control de sistemas en el ámbito del hogar e industrial, u otras).

El primer paso en la extracción de la información semántica compete al decodificador conceptual, un módulo que fragmenta la frase textual de entrada asignando a cada segmento (secuencia de palabras) un concepto perteneciente al dominio de la aplicación; etiqueta cada palabra con una categoría semántica. Las categorías semánticas del dominio representan en muchos casos la misma información semántica que el propio concepto al que están vinculadas; en otros casos son varias las categorías semánticas que transportan la información (significado) completa del concepto. En dominios sencillos los conceptos pueden coincidir con las categorías semánticas y este módulo ser sólo un categorizador donde cada palabra es una categoría o concepto.

El decodificador conceptual debe estar capacitado para procesar las frases de entrada con errores de palabras, lo que exige usar modelos gramaticales relajados, robustos frente a tales errores. Pero, por culpa de la relajación del modelo, no pueden resolverse problemas de ambigüedad semántica que aparecen en las frases de entrada (fechas, números, etc.) o se pierden los "vínculos" entre palabras (categorías semánticas) que no se enuncian juntas en la frase de entrada aunque forman parte del mismo concepto, como en los pares atributo-valor.

Para resolver las ambigüedades se recurre a reglas de contexto, rasgos semánticos y otros, así como a un módulo adicional de cartografía conceptual ("mapeador").

Si las frases no son muy complejas, el módulo de generación de plantillas semánticas se encarga de procesar los fragmentos de frase asociados a cada concepto y rellenar una estructura de datos (plantilla), donde se prepara la información semántica contenida en la



Arquitectura del módulo general de comprensión desarrollado en el laboratorio del Grupo de Tecnología del Habla, de la Universidad Politécnica de Madrid, junto a los dos módulos dependientes que nos han permitido experimentar con dos tareas que hacen uso de interfases inteligentes habladas. En una tarea, un experto realiza cuestiones complejas en un sistema de bases de datos con múltiples informaciones sobre barcos de la Armada, que además se suponen actualizadas en tiempo real. En la otra tarea, un usuario (estamos pensando incluso en una persona que sólo pueda hablar debido a una discapacidad) puede controlar un equipo de alta fidelidad formado por tres reproductores de discos compactos, dos cintas y una radio. El sistema confirma al usuario, gracias al generador de respuesta del módulo general y a un sintetizador de voz, todas las acciones realizadas. En la evolución de este sistema queremos dialogar con el usuario para completar con algunas preguntas la información que quizás el usuario no ha proporcionado en una primera intervención. Esto dotará de más naturalidad a la interfase, permitiendo su uso por parte de personas que desconozcan las características concretas del equipo de alta fidelidad, ya que ante frases ambiguas el sistema dialogará para negociar una acción concreta

frase para su interpretación y ejecución ulterior de algún tipo de acción que dicha interpretación exija, lo que se lleva a cabo en el módulo dependiente de la aplicación: traductor a un lenguaje máquina en el caso de accesos a bases de datos, actuador y transmisor de infrarrojos (IR) para enviar órdenes de control mediante IR a un sistema de alta fidelidad, o a un ordenador que controla un robot.

En el caso de frases complejas, son también estructuras complejas de datos las plantillas generadas. Para decidir las plantillas que hay que rellenar y simplificar dicho proceso, se incluye un módulo analizador y transformador estructural que informa de la complejidad y del tipo de frase a "interpretar".

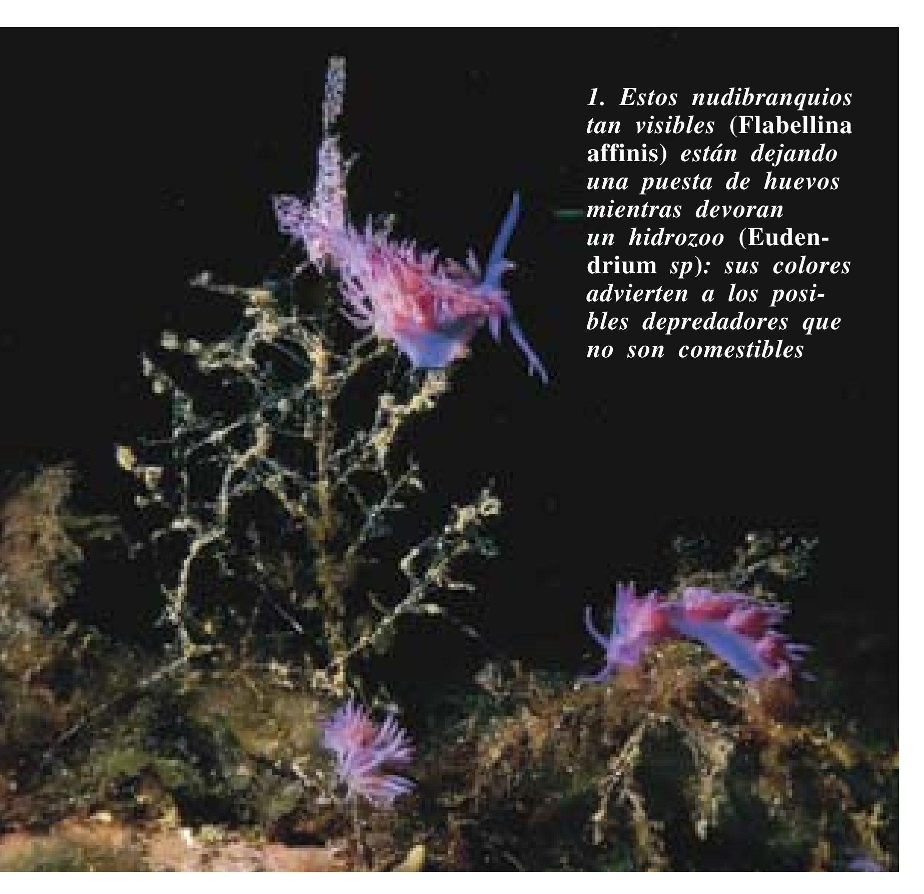
Todos los módulos excepto el decodificador conceptual usan gramáticas basadas en reglas, dependientes del dominio de aplicación, y deben ser generadas cada vez que cambiamos de dominio. Para este proceso hace falta el empleo de expertos y es un proceso laborioso que necesita depuración.

J. COLÁS. J. FERREIROS
y J. M. PARDO
Grupo de Tecnología del Habla,
Dpto. Ingeniería Electrónica,
E.T.S.I.T. Madrid

De cerca

Texto y fotos: Sergio Rossi

¿Camuflarse o exhibirse?

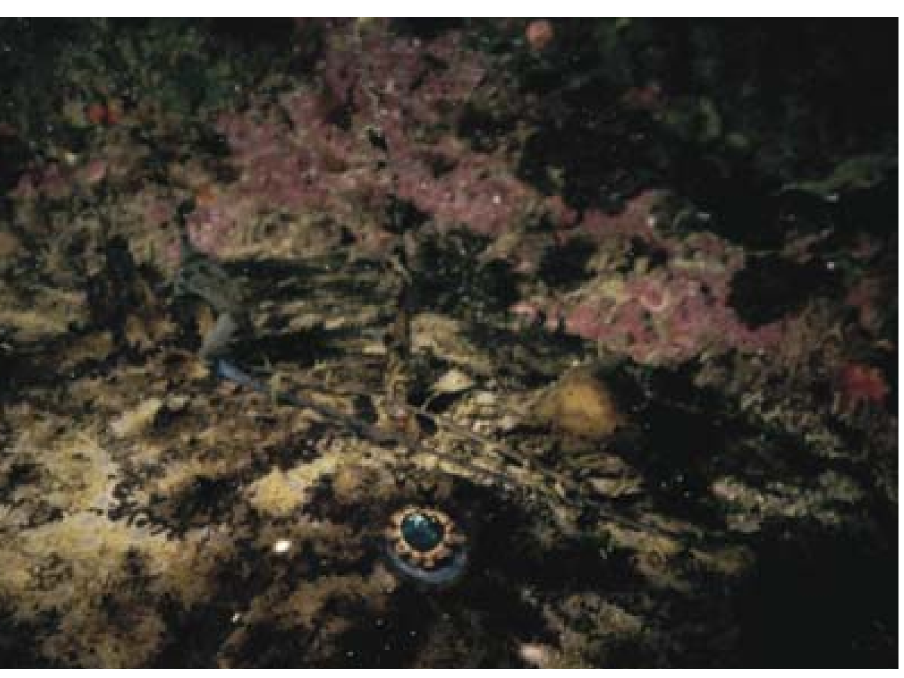


1. Estos nudibranquios tan visibles (**Flabellina affinis**) *están dejando una puesta de huevos mientras devoran un hidrozoo* (**Eudendrium** *sp*)*: sus colores advierten a los posibles depredadores que no son comestibles*

En medio del ambiente bélico en el que nos toca vivir, estamos sometidos a un bombardeo continuo de imágenes en las que soldados de toda especie y condición se nos presentan con atuendos de "camuflaje" pensados para confundir al enemigo. Estos patrones crípticos han bebido en la eterna fuente de inspiración, la naturaleza. Muchos organismos móviles que viven en el mar (y por supuesto también en tierra) utilizan mecanismos para esconderse, para no ser vistos por los depredadores o por las presas.

En muchos casos, los colores disruptivos de los animales (es decir, colores que imitan fondos irregulares con diseños irregulares) varían según el fondo donde se hallan. Buenos ejemplos son las escórporas y los pulpos. Presentan una "segunda línea de defensa", proporcionada por una aleta dorsal cargada de veneno en el caso del pez y por una cortina de tinta en el caso del cefalópodo.

Otras veces, como en el rape, la superficie del animal no cambia de color, pero imita tan bien el fondo (rocas, arena, algas, etc.) que sus presas no se percatan de su presencia hasta que son devoradas. Sin embargo, no todos los organismos optan por jugar al escondite. Los moluscos nudibranquios aparecen a menudo con llamativos colores, debido a su posesión de sustancias tóxicas o de muy mal gusto. Sus potenciales depredadores aprenden a distinguir los comestibles de los desechables; por eso, a pesar de sus llamativos atuendos, no suelen ser molestados. Es el dilema de numerosos organismos móviles: ¿Me dejo o no me dejo ver?

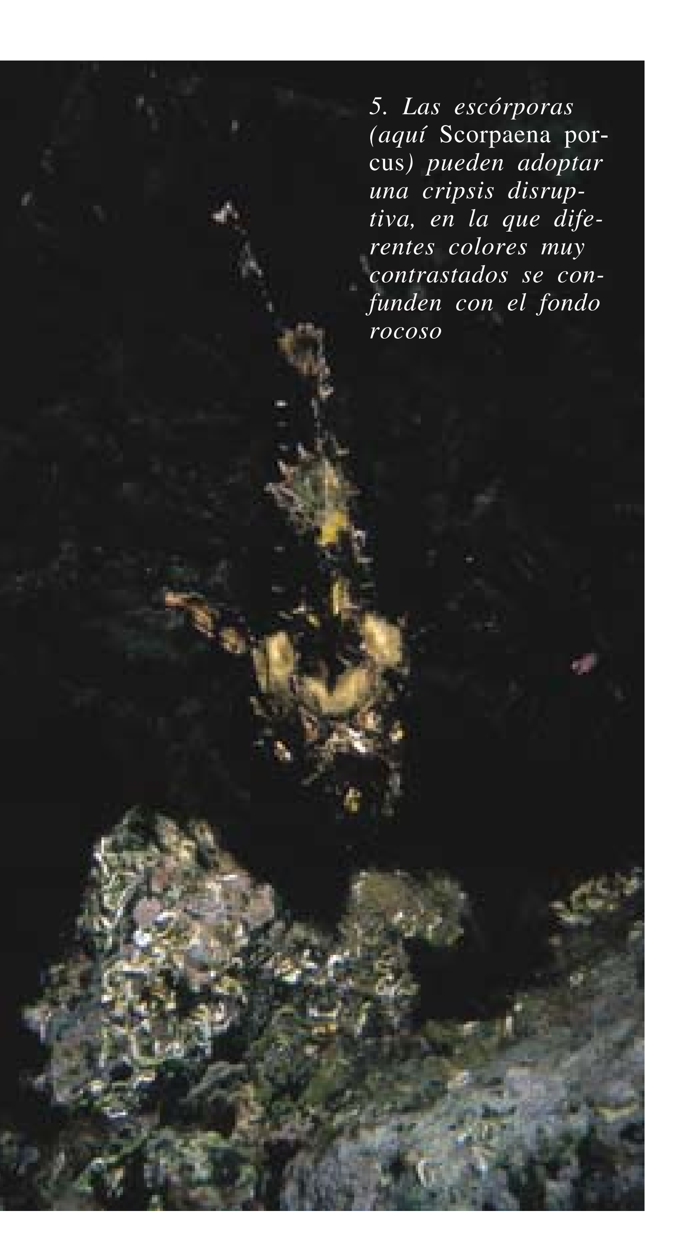


2. Lo único visible de este rape (Lophius piscatorius) *son sus ojos. La pequeña extensión encima de los globos oculares constituye su peculiar "caña de pescar", con la que atrae a sus presas para devorarlas*



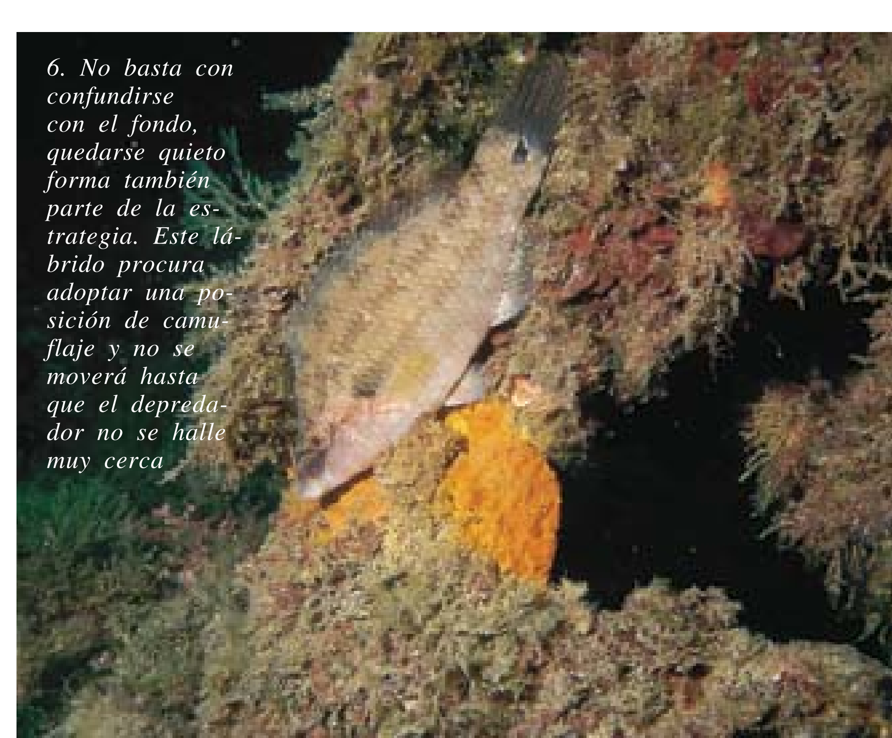
3. Un caso curioso nos lo ofrece este blénido (Tripterygion *sp*)*, muy visible en la época de reproducción y críptico el resto del año*

4. El pulpo (Octopus vulgaris) *es uno de los reyes de la cripsis. Muda fácilmente de color gracias a un entramado de células especializadas en la labor del camuflaje que pueden servirle también en la época de reproducción o para expresar cambios de "humor"*



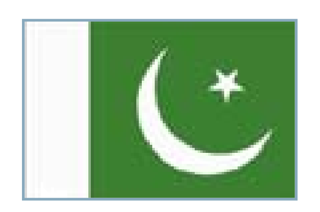
5. Las escórporas (aquí Scorpaena porcus*) pueden adoptar una cripsis disruptiva, en la que diferentes colores muy contrastados se confunden con el fondo rocoso*





6. No basta con confundirse con el fondo, quedarse quieto forma también parte de la estrategia. Este lábrido procura adoptar una posición de camuflaje y no se moverá hasta que el depredador no se halle muy cerca

Poder nuclear de la India y Pakistán



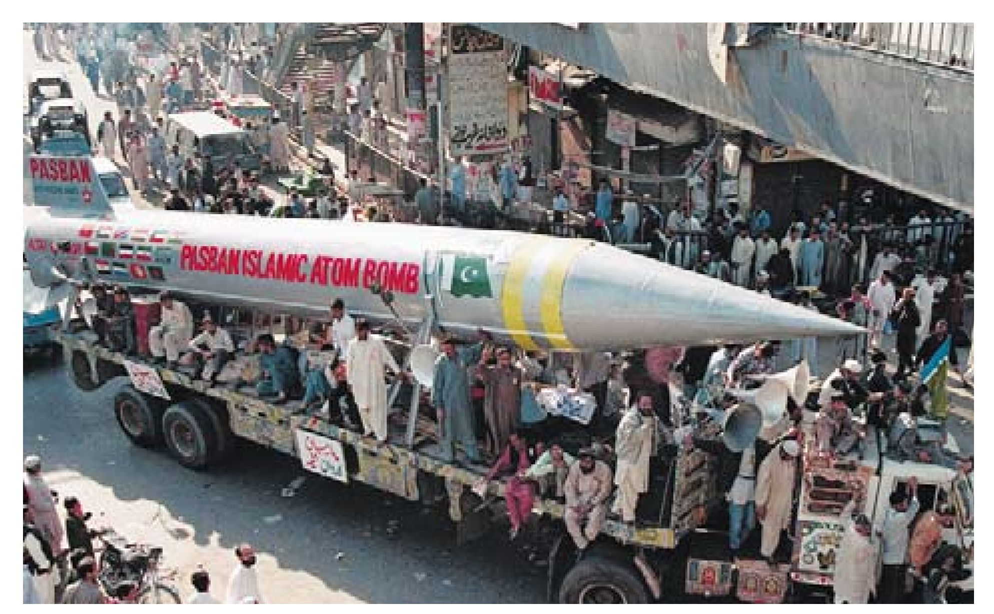
El subcontinente indio es el lugar más probable para una guerra nuclear

M. V. Ramana y A. H. Nayyar

Cuando EE.UU. movilizaba sus fuerzas armadas en los días que siguieron a los ataques terroristas del 11 de septiembre, la atención mundial convergía en Pakistán, país crucial para las operaciones militares en Afganistán. El 14 de septiembre el presidente paquistaní, Pervez Musharraf, prometía su ayuda total a una fuerza multinacional. Pero muchos se preguntaron sobre el peligro que encerraba el arsenal nuclear de Pakistán. Por si acaso, la administración Bush proyectó un plan de seguridad perimétrica y otras ayudas para custodiar las instalaciones nucleares de ese país. Posteriores ataques terroristas han incrementado ese recelo.

La inquietud ante las armas nucleares del sudeste asiático subió de grado en mayo de 1998. A las cinco pruebas nucleares realizadas por la India en Pokharan, en su desértico estado noroccidental de Rajasthan, siguieron, mes y medio después, seis explosiones nucleares ensayadas por Pakistán en su región sudoccidental de Chaghai. Aquella macabra partida de tres en raya reavivaba el forcejeo nuclear de EE.UU. y la ex Unión Soviética, aunque con una diferencia crucial: entre las dos superpotencias de la guerra fría mediaba un océano y, además, nunca lucharon abiertamente. La India y Pakistán son dos vecinos que han ido a la guerra tres veces desde que se dividió la India británica, en 1947, entre un estado de mayoría musulmana y un estado de mayoría hindú. Aún hoy la artillería dispara regularmente desde ambos lados de la frontera en la disputada región de Cachemira.

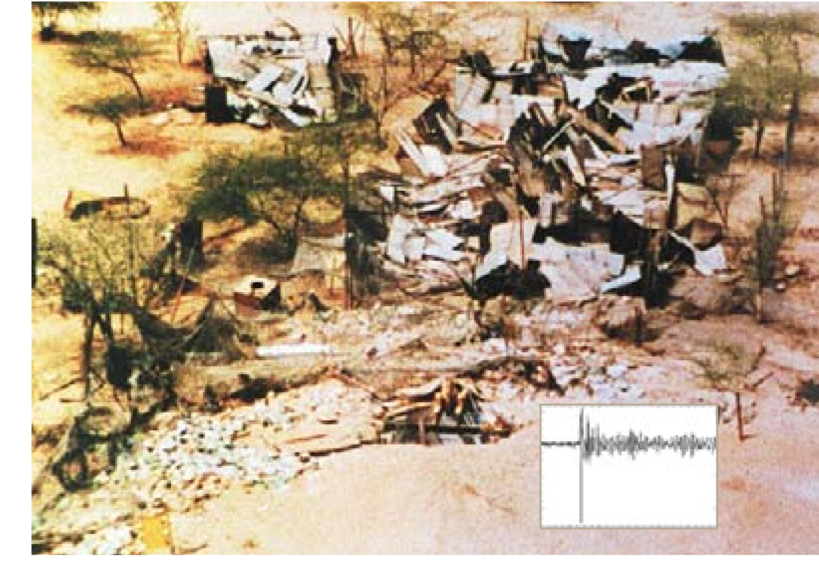
En mayo de 1999, a un año justo de las pruebas nucleares, se desencadenaron unos violentos combates por la ocupación de un saliente montañoso cercano a Kargil, una población de Cachemira. Aquel conflicto de dos meses se cobró de 1300 (según la India) a



1. UN MISIL DE CARTON-PIEDRA desfila por las calles de Karachi acompañado de la Pasban, rama juvenil del principal partido fundamentalista de Pakistán, Jamaat-e-Islami. El desfile tuvo lugar en febrero de 1999 durante la jornada de solidaridad con los separatistas de Cachemira bajo administración india. El entusiasmo por las armas nucleares está muy extendido en la India y en Pakistán, sin ser general.

1750 (según Pakistán) vidas. Por primera vez desde 1971, la India desplegó su fuerza aérea en ataque. Pakistán reaccionó dispersando al instante sus aviones de caza por temor a que pudieran ser alcanzados en tierra; en Islamabad, la capital, sonaron las sirenas de ataque aéreo. Funcionarios de alto rango de ambos países lanzaron al menos una docena de amenazas nucleares. La paz y estabilidad que algunos historiadores y politólogos atribuyen a las armas nucleares (se supone que los países nucleares temen a la destrucción mutua asegurada) brillaron por su ausencia.

Prevaleció el buen sentido. Pero el final del choque de Kargil no marcó el final de la confrontación nuclear en el sudeste asiático. El proyectado despliegue de armas nucleares por uno y otro país aumenta las tensiones. En Pakistán la inestabilidad política es una posibilidad real, alimentada por el conflicto afgano.



2. UNA EXPLOSION NUCLEAR SUBTERRANEA realizada por la India el once de mayo de 1998 causó el derrumbe de la superficie inmediatamente superior. Las lecturas sísmicas (*recuadro*) sugieren que el rendimiento fue de 16 a 30 kilotones, aproximadamente la mitad de lo declarado por la India.

La tentación nuclear

Ambos países han estado aumentando sus programas nucleares desde que consiguieron la independencia de Gran Bretaña. Para imaginar qué hacer ahora, y también para evitar una mayor proliferación de armas nucleares, resulta imprescindible conocer esa historia. Aunque el enfrentamiento entre la India y Pakistán posea unas características locales propias, ambos países deben mucho a otros estados nucleares. Los materiales usados en sus bombas se fabricaron con técnicas occidentales; las justificaciones de ambos países para sumarse al club nuclear se retrotraen al pensamiento de la guerra fría. La sostenida dependencia de EE.UU. y Rusia de millares de armas nucleares puestas en estado de máxima alerta no hace sino reforzar en la India y Pakistán la sensación de que los arsenales nucleares son necesarios.

En 1948, al crear la Comisión de Energía Atómica India (CEAI), Jawaharlal Nehru, primer jefe de gobierno que tuvo la India, expuso su deseo de que el país "desarrolle (la energía atómica) para fines pacíficos". Pero a la vez reconocía que "si nos vemos obligados como nación a emplearla para otros fines, ningún sentimiento piadoso nos detendrá". Esa ambivalencia fue siempre un rasgo esencial de la política nuclear india durante su desarrollo.

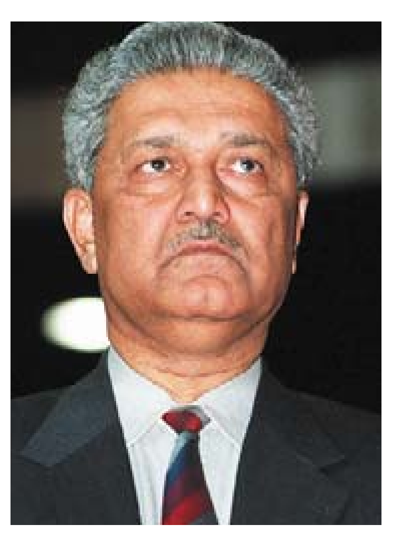
Para los dirigentes indios, el programa simbolizaba influencia en la política internacional y modernidad técnica. A lo largo de los dos decenios siguientes, la India empezó a construir y explotar reactores nucleares, extraer uranio, fabricar combustible y obtener plutonio. En términos de la electricidad producida, esas actividades se mostraron a menudo antieconómicas, actividades en las que difícilmente puede creerse que un país en desarrollo deba invertir sus recursos. Políticos y científicos justificaban el programa nuclear sobre la base de que fomentaba la autosuficiencia, tema en boga en la India poscolonial. Retóricas aparte, la India solicitó y recibió abundante ayuda de Canadá, EE.UU. y otros países.

En 1962, tras la derrota india en la guerra fronteriza con China, algunos políticos derechistas demandaron por primera vez en público un arsenal nuclear. Tales llamadas se hicieron más intensas tras la primera prueba nuclear china en 1964. Figuras destacadas se opusieron a ese movimiento, aduciendo que el costo económico sería demasiado alto. Partidarios de la bomba eran muchos científicos preeminentes. Homi Bhabha, físico teórico director de la CEAI, afirmó que su organización podría construir armas nucleares "en 18 meses". Citando un informe del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, predijo Bhabha que las bombas nucleares serían baratas. Prometió también beneficios económicos merced a "explosiones nucleares pacíficas", que muchos norteamericanos alababan, para excavar canales y otras obras de ingeniería.

En noviembre de 1964 el primer ministro indio Lal Bahadur Shastri transigió y permitió que la comisión sondease la técnica de ese tipo de explosiones. Resultó que Bhabha ya había estado dando algunos pasos. Según se dijo, en 1960 había enviado a Francia a Vasudev Iya, joven químico, para que absorbiera toda la información que le fuera posible acerca de la preparación del polonio (elemento químico empleado para iniciar una explosión nuclear). Bhabha murió en 1966 y los trabajos del proyecto del ingenio "pacífico" se interrumpieron durante otros dos años. Pero a finales de los sesenta, entre 50 y 75 científicos e ingenieros estaban ya desarrollando armas. Su trabajo culminó con la primera prueba atómica de la India, la detonación el 11 de mayo de 1974 de una bomba de plutonio con un rendimiento de cinco a 12 kilotones. La bomba lanzada sobre Hiroshima tenía un rendimiento de unos 13 kilotones.

El vuelco nuclear

La prueba de 1974 fue recibida con entusiasmo en la India y con consternación en el resto del mundo. Los países occidentales cortaron los esfuer-





3. PADRES DE LAS BOMBAS ATOMICAS: A. Q. Khan (*izquierda*) montó la planta de centrifugación de Kahuta, donde se produce el uranio de las bombas paquistaníes. Homi Jehagir Bhabha (*derecha*), físico teórico que estudió en la Universidad de Cambridge, sentó las bases de la capacidad nuclear india.

zos de cooperación en asuntos nucleares y formaron el Grupo de Abastecedores Nucleares, que impone limitaciones a la exportación de técnicas y materiales nucleares hacia los países que rehúsan firmar el Tratado de no Proliferación Nuclear de 1968, la India y Pakistán incluidos.

En los años siguientes, el grupo pro bomba demandó pruebas de armas más avanzadas, tales como las de fisión reforzada y de hidrógeno. Parece que a fines de 1982, o principios de 1983, la primera ministro india Indira Gandhi dio su consentimiento a otro ensayo, para cambiar de opinión a las 24 horas. Se atribuye esa rectificación radical a la conversación que mantuvo con su ministro de exteriores, a quien un funcionario norteamericano le habría mostrado pruebas de satélite sobre los preparativos en el polígono de ensayos. Parece que la conversación convenció a Gandhi de que la reacción de EE.UU. crearía dificultades económicas a la India. Según informes, Indira Gandhi pretendía "desarrollar otras cosas y mantenerlas a punto".

Las "otras cosas" que tenía en la mente eran misiles balísticos. En 1983, bajo la dirección de Abdul Kalam, famoso ingeniero de cohetes, se creó el Programa de Desarrollo Integrado de Misiles. A ello siguió un primer y secreto intento de rediseñar un misil antiaéreo soviético que la India había adquirido en los años sesenta. Aunque el proyecto fracasó, desembocó en el desarrollo de técnicas críticas, en particular un motor cohete. Kalam adoptó un estilo de gestión abierto (comparado con el cerrado programa de investigación militar) e implicó a instituciones académicas y empresas privadas. Previendo restricciones sobre las importaciones, la India se lanzó a comprar giróscopos, acelerómetros y simuladores de movimiento a proveedores franceses, suecos, norteamericanos y alemanes.

En 1988, probó su primer misil tierra-tierra de corto alcance. Un año después siguió un misil de alcance medio; y en abril de 1999, un misil de mayor alcance. Este puede volar 2000 kilómetros, hasta el corazón de China. Pese a esas capacidades, es improbable que la India alcance la paridad nuclear con China. Según distintas estimaciones, el país comunista posee 400 ojivas nucleares, y unas existencias de material fisible equivalentes a entre 200 y 575 armas más. Si los reactores indios productores de plutonio han estado funcionando a una media del 50 al 80 por ciento de su potencia total, la India dispondrá de entre 55 y 110 armas de plutonio. Las reservas podrían ser mucho mayores si los reactores comerciales destinados a la generación eléctrica hubieran estado también produciendo plutonio para fines militares.

Pakistán

El programa nuclear paquistaní nació del deseo de igualar a la India en cualquier campo. El país creó su Comisión de Energía Nuclear en 1954, comenzó a explotar su primer reactor de investigación en 1965 e inauguró su primer reactor comercial en 1970. En su calidad de asesor científico del gobierno, Abdus Salam, quien luego recibiría el premio Nobel de física, desempeñó un papel importante.

La carestía de personal preparado constituía un grave obstáculo al principio. En 1958 la comisión contaba sólo con 31 científicos e ingenieros y estaba dirigido por Nazir Ahmad, quien había estado al frente de la Comisión Textil. La comisión se ciñó a un programa de formación intensa de personal enviando más de 600 científicos e ingenieros a EE.UU., Canadá y Europa occidental. Con una ayuda generosa de esos países, algunos de los cuales auxiliaban también a la India, Pakistán tenía en obra algunos laboratorios de investigación nuclear mediados los años sesenta.

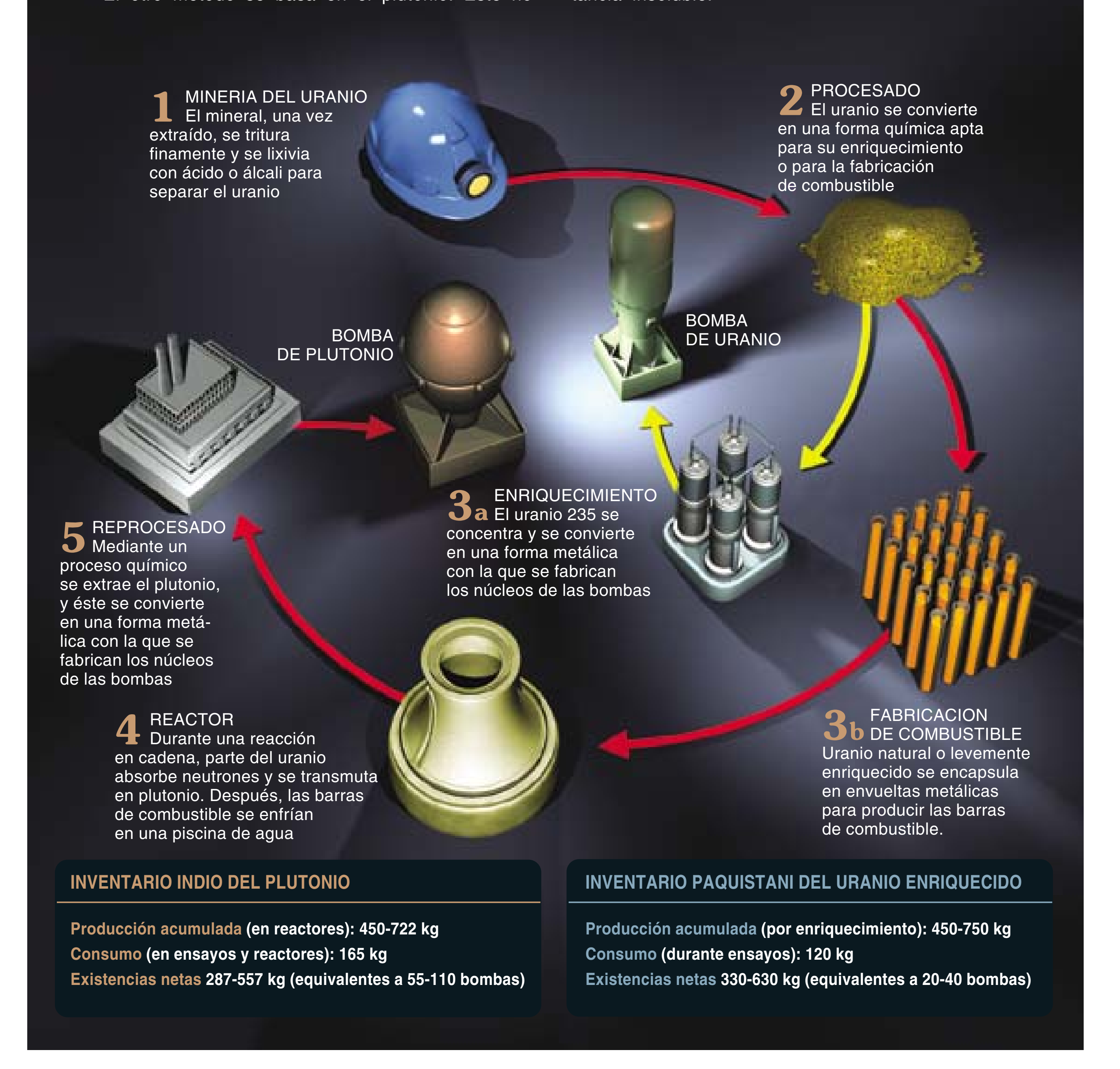
Tras la guerra de 1965 con la India, muchos políticos, periodistas y científicos paquistaníes pidieron con insistencia el desarrollo de armas nucleares. El más destacado fue el ministro de exteriores Zulfikhar Ali Bhutto, que hizo famosa la frase de que si la India desarrollase una bomba atómica, Pakistán haría lo mismo "aunque tengamos que comer hierba o seguir pasando hambre". Tras la derrota paquistaní en la guerra de 1971, Bhutto llegó a primer ministro. En enero de 1972 convocó una reunión de científicos para tratar de la fabricación de bombas.

Como primer frente de su esfuerzo para hacerse con material militar, los investigadores intentaron adquirir plantas de reprocesado de plutonio a Francia y Bélgica. Tras acordar inicialmente la venta, Francia se echó atrás bajo presión norteamericana. Pero varios científicos paquistaníes fueron admitidos en Bélgica para formarse en técnicas del reprocesado. De vuelta en Pakistán, construyeron un laboratorio de reprocesado a pequeña escala a principios de los años ochenta. Empleando combustible agotado procedente de un reactor productor de plutonio inaugurado en 1998, ese laboratorio está capacitado para producir al año el plutonio necesario para, quizá, cuatro bombas.

MATERIALES PARA BOMBAS NUCLEARES

La parte más difícil de la fabricación de armas nucleares reside en la obtención del combustible, sea plutonio o uranio altamente enriquecido. El punto de partida es el uranio natural, que contiene un 99,3 por ciento de uranio 238 y un 0,7 por ciento de uranio 235. Para fabricar una bomba de uranio, hay que elevar el contenido de uranio 235 hasta un 80 por ciento o más. La mayoría de las plantas de enriquecimiento, incluidas las de India y Pakistán, emplean centrífugas de alta velocidad [*véase* "La centrífuga de gas", por Donald R. Olander; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 1978].

El otro método se basa en el plutonio. Este no es un elemento químico natural. Se produce irradiando uranio en los reactores nucleares; luego, se extrae mediante una operación de reprocesado [*véase* "Reprocesado de los combustibles nucleares", por William P. Bebbington; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 1977]. En el sistema habitual de reprocesado, el combustible irradiado se trocea, se disuelve en ácido y se expone a un disolvente (fosfato de tributilo mezclado con queroseno). El solvente separa el plutonio y el uranio de los otros productos de la fisión. Seguidamente, el plutonio se hace precipitar mediante un reductor, compuesto químico que lo transforma en una sustancia insoluble.



INVENTARIO INDIO DEL PLUTONIO

Producción acumulada (en reactores): 450-722 kg
Consumo (en ensayos y reactores): 165 kg
Existencias netas 287-557 kg (equivalentes a 55-110 bombas)

INVENTARIO PAQUISTANI DEL URANIO ENRIQUECIDO

Producción acumulada (por enriquecimiento): 450-750 kg
Consumo (durante ensayos): 120 kg
Existencias netas 330-630 kg (equivalentes a 20-40 bombas)

Escenario nuclear

Durante medio siglo, en Cachemira, la India y Pakistán han librado una incesante guerra de bajo nivel y entablado una carrera de armas nucleares. Mientras, centenares de millones de personas de la región no salen de la pobreza.

KAZAKHSTAN
UZBEKISTAN
BISHKEK
KIRGUIZISTAN
CACHEMIRA
TAYIKISTAN
DUSHANBE
KAHUTA
Laboratorios de investigación Khan
ISLAMABAD
KARGIL
KABUL
RAWALPINDI
Nuevos laboratorios
TURKMENISTAN
ASHGABAT
AFGANISTAN
LAHORE
KHUSHAB
Reactor de investigación y producción de plutonio
DERA GHAZI KHAN
Mina de uranio
POKHARAN
Polígono nuclear
LOMAS DE CHAGAI
Polígono nuclear
PAKISTAN
Río Indo
KARACHI
IRAN
Mar Arábigo
MUSCAT
OMAN
YEMEN



Instalaciones nucleares paquistaníes §

REACTORES

Reactor de investigación y producción de plutonio, 40-70 MW*
LUGAR: Khushab
INAUGURACION: 1998
SOCIO EXTRANJERO: China
MODERADOR: agua pesada (?)
REFRIGERANTE: agua pesada
PRODUCCION ANUAL: 6,6-18 kg de plutonio†

REPROCESADO DE PLUTONIO

Nuevos laboratorios
LUGAR: Rawalpindi
INAUGURACION: principios del decenio de los ochenta
PRODUCCION ANUAL: 12-20 kg de plutonio

ENRIQUECIMIENTO DE URANIO

Laboratorios de investigación Khan
LUGAR: Kahuta
INAUGURACION: 1984
PRODUCCION ANUAL: 57-93 kg de uranio altamente enriquecido

MINA DE URANIO

Dera Ghazi Khan
INAUGURACION: 1974
PRODUCCION ANUAL: 23-30 toneladas

GHAURI
alcance: 1500 km
MISIL BALISTICO DE CORTO ALCANCE
alcance: 300 km
Pekín
CHINA
Shanghai
PAKISTAN
Nueva Delhi
INDIA
Hong Kong
Mumbai
PRITHVI II
alcance: 250 km
AGNI
alcance: 2000 km

Los misiles indios de mayor alcance pueden cubrir todo Pakistán y la mayor parte de China, aunque las principales ciudades costeras quedan a un tiro de piedra. Los equivalentes paquistaníes cubren casi todo el territorio indio.


CHINA
NEPAL
BHUTAN
THIMBU
KATHMANDU
NUEVA DELHI
Río Ganges
DACCA
CALCUTA
JADUGODA
Mina de uranio
BANGLADESH
INDIA
Golfo de Bengala
TARAPUR
PREFRE
MUMBAI
Dhruva
Trombay
CIRUS
KALPAKKAM
KARP
Reactor nodriza
de ensayos
CHENNAI
MYSORE
Rattehalli
COLOMBO
Océano Indico
SRI LANKA
Instalaciones nucleares indias§
REACTORES
CIRUS, 40 MW*
LUGAR: Mumbai
INAUGURACION: 1960
SOCIO EXTRANJERO: Canadá
MODERADOR: agua pesada
REFRIGERANTE: agua ligera
PRODUCCION ANUAL: 6,6-10,5 kg de plutonio†
Dhruva, 1000 MW*
LUGAR: Mumbai
INAUGURACION: 1985
MODERADOR: agua pesada
REFRIGERANTE: agua pesada
PRODUCCION ANUAL: 16-26 kg de plutonio†
Reactor nodriza de ensayos, 40 MW*
LUGAR: Kalpakkam
INAUGURACION: 1983
SOCIO EXTRANJERO: Francia
REFRIGERANTE: sodio líquido
PRODUCCION ANUAL: 4-6,4 kg de plutonio†
REPROCESADO DE PLUTONIO
Trombay
LUGAR: Mumbai
PUESTA EN SERVICIO: 1964
CAPACIDAD ANUAL: 30-50 toneladas de combustible metálico agotado
PREFRE
LUGAR: Tarapur
PUESTA EN SERVICIO: 1977
CAPACIDAD ANUAL: 100 toneladas de combustible óxido agotado
KARP
LUGAR: Kalpakkam
PUESTA EN SERVICIO: 1997
CAPACIDAD ANUAL: 100-125 toneladas de combustible óxido agotado
ENRIQUECIMIENTO DE URANIO
Rattehalli††
LUGAR: Mysore
INAUGURACION: 1990
PRODUCCION ANUAL: desconocida
MINA DE URANIO
Jadugoda
INAUGURACION: 1968
PRODUCCION ANUAL: 200 toneladas
*Potencia térmica suministrada
†Trabajando al 50-90 % de su capacidad
††Se cree que produce combustible para un submarino atómico
§Instalaciones de producción militar; se omiten los reactores comerciales

En un segundo frente, los investigadores exploraron las técnicas de enriquecimiento del uranio, es decir, las que permiten concentrar el isótopo 235 del uranio, utilizado en las bombas. En 1975, se unió al grupo A. Q. Khan, metalúrgico paquistaní que había trabajado en una planta de enriquecimiento de los Países Bajos. Con él llegó información de diseño clasificada y listas de suministradores occidentales de componentes, muchos de los cuales se mostraron dispuestos a violar las leyes de control de exportaciones. El éxito le sonrió en 1979 con el enriquecimiento de pequeñas cantidades de uranio. Desde entonces, se estima que Pakistán ha producido uranio enriquecido en cantidad para 20 o 40 bombas. Cada año produce la cantidad necesaria para otras cuatro o seis bombas.

Hacia 1984 se informó de que había culminado la fabricación de bombas aerotransportadas. Por esas mismas fechas, algunos funcionarios estadounidenses empezaron a alegar que China había cedido a Pakistán el diseño de una bomba especial para misiles. No cabe la menor duda de que China y Pakistán han intercambiado técnicas y equipos en muchas áreas, incluidas las de armas nucleares y misiles. Se cree que Pakistán ha importado misiles de corto alcance de China. Pero la acusación de que China suministrase a Pakistán diseños para armas nunca se ha substanciado. Como no podía ser de otro modo, los científicos paquistaníes lo han negado.

En la primavera de 1990, los sucesos de Cachemira amenazaron con desencadenar otra guerra a gran escala. Según un artículo del periodista Seymour M. Hersh publicado en 1993 en el *New Yorker*, los satélites estadounidenses detectaron un convoy de camiones que salían de Kahuta, la planta de enriquecimiento de uranio paquistaní, en dirección a una base aérea donde esperaban cazas F-16 listos para despegar. Según Hersh la diplomacia norteamericana transmitió esa información a la India, que retiró sus tropas apostadas en la frontera. Pero, de acuerdo con la opinión predominante entre los expertos que analizaron aquellas declaraciones, Pakistán nunca consideró el uso de armas nucleares; los entendidos son asimismo escépticos acerca de que los satélites norteamericanos llegaran a detectar los movimientos alegados. Sin embargo, los partidarios paquistaníes de la bomba han esgrimido esas informaciones para mantener que las armas nucleares protegen al país del ataque indio. En la India, los responsables nunca han acusado recibo de lo relatado por Hersh; sería admitir que la capacidad nuclear de Pakistán habría neutralizado la ventaja militar en armas tradicionales de la India.

Una *yihad* nuclear

El ulterior crecimiento de las capacidades nucleares de ambos países tuvo lugar sobre el trasfondo del fin de la guerra fría. Los arsenales de las superpotencias menguaron. El Tratado de Prohibición Total de Pruebas se negoció en 1996, pero los cinco estados declarados nucleares (EE.UU., Rusia, Gran Bretaña, Francia y China) dejaron claro que pretendían aferrarse a sus arsenales. Tan paradójica yuxtaposición reforzó a los grupos pro bomba en la India y Pakistán.

Los acontecimientos internos añadieron más presión. La India presenció el surgir del nacionalismo hindú. Durante decenios, los partidos adscritos a esa ideología, así el Bharatiya Janata (PBJ), habían abogado por una mayor capacidad militar, nuclear incluida. No sorprendió, por tanto, que el PBJ encargase pruebas nucleares nada más llegar al poder en marzo de 1998.

Las pruebas indias, una tras otra, brindaron la excusa perfecta a los partidarios paquistaníes de la bomba. Nuevamente, los extremistas religiosos abogaron por ella. Qazi Hussain Ahmad del Jamaat-e-Islami, uno de los mayores grupos islamistas de Pakistán, había declarado en 1993: “Hagamos la *yihad* por Cachemira. Un Pakistán con armas nucleares disuadiría a la India de ampliar el conflicto”. Mientras, los militares solicitaban armas nucleares para contrarrestar a las poderosas fuerzas armadas indias.

Aquellas presiones remitieron con la intervención de la diplomacia norteamericana y china tras las pruebas de la India. Además, algunos analistas y activistas enumeraron los efectos nocivos que resultarían de las sanciones económicas que seguirían a cualquier prueba nuclear. Sugirieron que Pakistán no siguiera la senda de la India (y que ésta afrontara sola las iras internacionales). En vano. A las tres semanas de las explosiones indias, Pakistán siguió adelante con sus propias pruebas.

No obstante las explosiones, la moderada intensidad de las señales sísmicas de las pruebas de ambos países ha arrojado dudas sobre los rendimientos explosivos declarados. Los datos publicados por la organización india de armamento nuclear en respaldo de sus afirmaciones son harto deficientes; a modo de ejemplo, una gráfica que dice ser de los rendimientos de subproductos radiactivos carece de unidades en los ejes. No se ha podido verificar si los dos países hicieron estallar todos los ingenios que alegan.

Detalles aparte, las pruebas han cambiado radicalmente la situación militar en Asia meridional. Han estimulado el desarrollo de armas más avanzadas, misiles, submarinos, sistemas de misiles antibalísticos y sistemas de mando y control. En agosto de 1999 la Doctrina Nuclear Propuesta India demandaba el despliegue de una tríada de “aviones,

Los autores

M. V. RAMANA y A. H. NAYYAR son físicos y activistas del pacifismo que han trabajado para soldar la fractura entre la India y Pakistán. Ramana, miembro del cuerpo investigador del Programa sobre Ciencia y Seguridad Global de la Universidad de Princeton, intervino en la fundación de la Coalición India para el Desarme Nuclear y la Paz. Nayyar, profesor de física en la Universidad de Quaid-e-Azam, en Islamabad, es cofundador de la Coalición por la Paz de Pakistán.

MISILES INDIOS

AGNI ("Fuego") I
TIPO: Primera etapa, combustible sólido; segunda etapa, combustible líquido
ALCANCE: 1500-2000 km
OJIVA NUCLEAR: 1000 kg
FASE DE DESARROLLO: Suspendido

AGNI II
TIPO: Combustible sólido, dos etapas
ALCANCE: 2000 km
OJIVA NUCLEAR: 1000 kg
FASE DE DESARROLLO: Ensayado en abril de 1999

PRITHVI ("La Tierra") I
TIPO: Combustible líquido, monoetapa; motor basado en el misil ruso SA-2 de defensa aérea
ALCANCE: 150 km
OJIVA NUCLEAR: 1000 kg
FASE DE DESARROLLO: Desplegado

PRITHVI II
TIPO: Combustible líquido, monoetapa
ALCANCE: 250 km
OJIVA NUCLEAR: 500 kg
FASE DE DESARROLLO: Ensayado en enero de 1996

PRITHVI III
TIPO: Combustible líquido, misil naval monoetapa
ALCANCE: 350 km (?)
OJIVA NUCLEAR: Dato desconocido
FASE DE DESARROLLO: En desarrollo

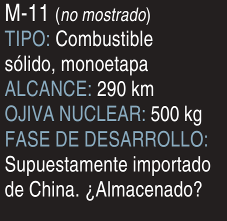
SAGARIKA (*no mostrado*)
("nacido en el océano")
TIPO: Misil crucero/balístico lanzado desde submarino
ALCANCE: 300 km (?)
OJIVA NUCLEAR: Dato desconocido
FASE DE DESARROLLO: En desarrollo

MISILES PAQUISTANIES

HAFT ("Armadura") I
TIPO: Combustible sólido; basado en un cohete sonda francés
ALCANCE: 60-80 km
OJIVA NUCLEAR: 500 kg
FASE DE DESARROLLO: Ensayado en enero de 1989

HAFT II
TIPO: Combustible sólido, monoetapa
ALCANCE: 280-300 km
OJIVA NUCLEAR: 500 kg
FASE DE DESARROLLO: Ensayado en enero de 1989

HAFT III
TIPO: Combustible sólido, monoetapa
ALCANCE: Hasta 600 km
OJIVA NUCLEAR: 250 kg
FASE DE DESARROLLO: Ensayado en julio de 1997



M-11 (*no mostrado*)
TIPO: Combustible sólido, monoetapa
ALCANCE: 290 km
OJIVA NUCLEAR: 500 kg
FASE DE DESARROLLO: Supuestamente importado de China. ¿Almacenado?

GHAURI
(Nombre de un rey afgano del siglo XII)
TIPO: Combustible líquido, monoetapa; similar a un misil norcoreano
ALCANCE: 1500 km
OJIVA NUCLEAR: 700 kg
FASE DE DESARROLLO: Ensayado en abril de 1998; producido en serie desde noviembre de 1998

SHAHEEN ("Aguila") I
TIPO: Combustible sólido, monoetapa
ALCANCE: 600-750 km
OJIVA NUCLEAR: 1000 kg
FASE DE DESARROLLO: Ensayado en abril de 1999; producido en serie desde noviembre de 1998

SHAHEEN II
TIPO: Combustible sólido, dos etapas
ALCANCE: 2400 km
OJIVA NUCLEAR: Dato desconocido
FASE DE DESARROLLO: En desarrollo



Referencia de escala

misiles terrestres móviles y equipos embarcados" para lanzar proyectiles nucleares. Tal sistema costaría unos ocho mil millones de dólares. En enero de 2001 el gobierno indio declaraba que desplegaría su nuevo misil de largo alcance. Un mes después, el segundo jefe del estado mayor naval paquistaní anunció que su país estaba pensando en dotar de misiles nucleares al menos a uno de sus submarinos nucleares.

La masa crítica

El despliegue aumenta el riesgo de que las armas nucleares se empleen en una crisis a causa de un accidente o un error de cálculo. Con unos tiempos de vuelo de los misiles de tres a cinco minutos entre los dos estados, los sistemas de alerta precoz resultan inútiles. Puede que los responsables no sepan de un lanzamiento hasta que vean desde su

Secretos, ¿qué secretos?

Los terroristas podrían explotar la displicente actitud de Pakistán hacia la información nuclear

David Albright

A lo largo de los años, los sucesivos gobiernos paquistaníes han asegurado a Occidente que su control sobre las armas, materiales y técnica nucleares del país es firme. Pero los analistas nunca se han sentido aliviados ante semejantes declaraciones. Podría muy bien ocurrir que en el programa de armas nucleares y en las fuerzas armadas paquistaníes abundaran los simpatizantes con el islamismo radical antioccidental u otras causas. Provoca especial inquietud el desarrollo histórico del programa paquistaní, que ha elevado los riesgos de ayudas ilegales y de otras violaciones de la seguridad.

Desde sus comienzos, el programa ha dependido de adquisiciones ilícitas y engaños deliberados. Ha auspiciado extensos contactos con turbios intermediarios y empresas cuya lealtad a los controles occidentales sobre las exportaciones depende del precio que se esté dispuesto a pagar. En el ámbito organizativo de ese programa, cualquier descontento podría encontrar abundantes justificaciones y oportunidades para transferir información clasificada o datos concretos sensibles. Otras personas podrían estar poco dispuestas a informar sobre las actividades sospechosas de sus colegas. Algunos incluso podrían sentirse propietarios de partes del programa y creerse en el derecho a vender sus aportaciones en beneficio propio.

Tales problemas afectan menos a la India, país que inició su programa de armas nucleares antes que Pakistán. La India obtuvo gran parte de su infraestructura nuclear de abastecedores extranjeros antes de que los gobiernos occidentales comprendieran hasta qué punto los países en desarrollo estaban abusando de la ayuda nuclear civil para hacer explosivos nucleares. Desde luego, Pakistán no está solo enfrentándose a una mentalidad que desprecia las pautas de seguridad. El programa civil alemán de centrífugas de gas se hizo famoso por su laxa seguridad. A finales de los años ochenta, los expertos nucleares alemanes ayudaron secretamente a Irak.

Un componente clave del programa paquistaní, la producción de uranio altamente enriquecido para bombas, nació de un acto de espionaje industrial. A mediados de los setenta, el padre del programa, A. Q. Khan, trabajaba en una firma de ingeniería holandesa y se le asignó la tarea de traducir planos y especificaciones clasificados de centrífugas de gas. Consiguió así el acceso a información sensible. Al volver a Pakistán, Kahn fundó los Laboratorios de Investigación de Ingeniería, que hoy llevan su nombre, para materializar sus conocimientos en una fábrica de bombas.

Según un memorando de 1983 desclasificado del Departamento de Estado de EE.UU., el programa de enriquecimiento de uranio disfrazó sus actividades mediante declaraciones falsas acerca del uso final de los artículos importados de los países occidentales. En una ocasión, Pakistán describió su planta centrifuga de gas como una fábrica de mantequilla sintética. En 1999, en una entrevista con el diario egipcio *Al-Ahram*, Khan afirmó que su programa adquiría suministros a través de compañías de fachada en Japón, Singapur y otros lugares. Esas compañías aceptaron un recorte del 15 al 25 por ciento en los precios.

Ante la información clasificada, Khan y sus colegas se mostraban como bandidos generosos. A finales de los ochenta publicaron una serie de artículos científicos acerca de las centrifugas de gas en revistas occidentales. Su intención era poner de manifiesto la autosuficiencia paquistaní en centrífugas, indicando así que el país estaba preparado para hacer una bomba. Un artículo expresaba su propósito del modo siguiente: "Proporcionar una informa-



SISTEMAS DE CENTRIFUGAS como estos, manejados por el grupo industrial europeo Urenco-Centec, fueron adquiridos de un modo fraudulento por los constructores de la bomba paquistaní.

ventana un cegador fogonazo. Por ello, mantendrán los dedos cercanos al botón o autorizarán a otros, geográficamente dispersos, a que lo hagan.

En líneas generales, se abre un doble panorama. En el primero se postula que la India cruza cierto umbral durante una guerra (que sus tropas llegan a las afueras de Lahore o que sus barcos bloquean Karachi) y que Pakistán reacciona con armas nucleares tácticas como advertencia. En el otro panorama se supone que, en las mismas circunstancias, Pakistán decide que unos disparos de advertencia no resultarían y, en vez de ello, ataca directamente una ciudad india. En 1998 uno de los autores (Ramana) dirigió el primer estudio científico del daño que causaría una modesta bomba de 1,5 kilotones lanzada sobre Bombay: en los dos o tres primeros meses morirían entre 150.000 y 850.000 personas.

Las fuerzas armadas indias se están preparando para tales eventualidades. En mayo pasado realizaron los ejercicios más extensos de los últimos diez años, bajo el nombre de Victoria Completa. Decenas de millares de soldados, apoyados por tanques, aviones y helicópteros de ataque efectuaron maniobras junto a la frontera paquistaní. El objetivo declarado era entrenar a las fuerzas para operar en un "entorno de ataque químico, biológico y nuclear" y "dar al enemigo una lección de una vez por todas". En uno de los ejercicios más destacados, las fuerzas debían "manejar una situación bélica enfrentándose a un avión enemigo portador de una ojiva nuclear". Abdul Kalam, director del proyecto indio de misiles, afirmó que las armas nucleares de la India "se están ensayando en operaciones militares... como entrenamiento de nuestros ejércitos".

Aun antes del once de septiembre, en Asia meridional se reunían todos los ingredientes para una guerra nuclear: posesión y desarrollo continuado de bombas y misiles, despliegue inminente de armas nucleares, precauciones insuficientes en evitación de un uso no autorizado de esas armas, proximidad geográfica, un conflicto permanente sobre Cachemira, movimientos extremistas religiosos y militaristas, sin olvidar unos dirigentes que parecen optimistas ante los peligros de una guerra nuclear.

Las limitaciones de la política occidental de no proliferación han quedado al descubierto. Basada en el control de exportaciones en lo referente a la oferta, para evitar el acceso a la técnica nuclear, se ha mostrado insuficiente en el caso del programa paquistaní. En una estrategia de no proliferación eficaz deben intervenir también medidas sobre la demanda, o sea, unas políticas que aseguren a los países que poseer la bomba no es ningún requisito para su seguridad. Aducen algunos que el desarme mundial y la no proliferación no guardan relación. Pero tal como observó George Perkovich, de la Fundación W. Alton Jones, en Charlottesville (Virginia), en su magistral estudio sobre el programa nuclear indio, esa premisa es "la mayor ilusión de la era nuclear". Puede que sea también la más peligrosa.

ción útil y práctica, ya que la información técnica sobre el equilibrado de los rotores de las centrífugas está envuelta en las nubes del secretismo". Esos artículos ayudaron a otros países, como Sudáfrica, en sus propios programas nucleares.

En uno de los artículos paquistaníes se encuentra el único estudio públicamente disponible sobre fuelles construidos con acero martensítico de carbono bajo, un material superresistente. Durante años, Urenco (un consorcio británico, alemán y holandés para el enriquecimiento de uranio) consideró una violación de las normas de secreto la simple mención de tales fuelles.

¿Qué más hicieron los científicos nucleares paquistaníes para propalar el arte de la fabricación de bombas? Las inspecciones de armas de la ONU en Irak dieron con un documento de la inteligencia iraquí, marcado *top secret*, que contenía una oferta paquistaní para ayuda en armas nucleares. Según el documento, un intermediario contactó a la inteligencia iraquí en octubre de 1990 (dos meses tras la invasión de Kuwait por Irak y tres meses antes del contraataque encabezado por EE.UU.) con la propuesta de que Khan entregaría a Irak planos de bombas, ayudaría a comprar materiales a través de una firma de Dubai y proporcionaría otros servicios. A cambio, Irak pagaría generosamente.

Los inspectores no lograron descubrir al intermediario. Pakistán y Khan han negado toda implicación. Sin embargo, los iraquíes tomaron en serio la oferta, aunque terminaron, al parecer, por rechazarla. Khidhir Hamza, especialista en armas que abandonó Irak en 1994 y trabajó conmigo a finales de los noventa, afirma que supo de la oferta en su momento y opina que Irak no la aceptó por temor a que Khan supiera demasiado sobre los programas nucleares iraquíes y acabara controlándolos. Khan ya tenía antecedentes engañando a los iraquíes, pues había empleado un contrato de una instalación petroquímica como tapadera para conseguir acero martensítico de carbono bajo.

En marzo del año 2001 el gobierno paquistaní le retiró a Khan la dirección del laboratorio nuclear y le nombró asesor especial de ciencia y técnica. La medida se considera un intento de tenerlo bajo su dominio. Pero el verano pasado surgieron rumores de que el laboratorio había mantenido vínculos con el programa norcoreano de misiles balísticos, resucitando los temores a la cooperación nuclear. Funcionarios paquistaníes han negado esas conexiones.

No hay pruebas de la conexión entre elementos del gobierno paquistaní con grupos terroristas. Sí se conocen los frecuentes contactos con los talibanes. Es plausible que esos lazos pudieran ser aprovechados por terroristas para acceder a material nuclear sensible. La mentalidad predominante dentro del programa aumenta ese riesgo.

David Albright es físico, presidente del Instituto para la Ciencia y la Seguridad Internacional en Washington, D.C., y ex inspector de armamento de la ONU en Irak.

Bibliografía complementaria

INDIA'S NUCLEAR BOMB: THE IMPACT ON GLOBAL PROLIFERATION. George Perkovich. University of California Press, 1999.

OUT OF THE NUCLEAR SHADOW. Dirigido por Smity Kothari y Zia Mian. Zed Books, 2001.

Estrellas primigenias

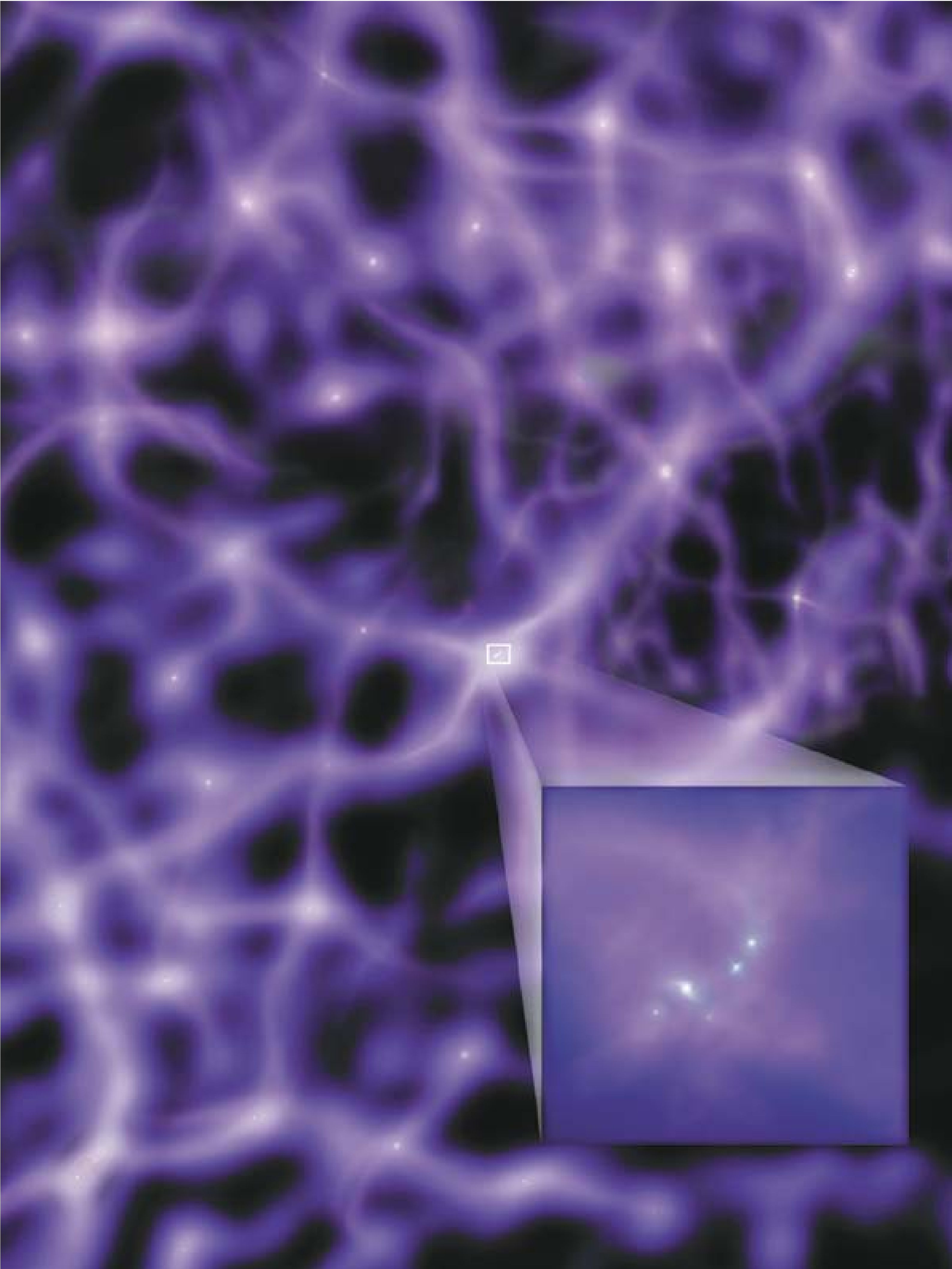
Con una masa y un brillo excepcionales, las primeras estrellas que irrumpieron en el universo cambiaron el curso de la historia cósmica

Richard B. Larson
y Volker Bromm

Vivimos en un universo repleto de cuerpos destellantes. En una noche clara miles de estrellas recrean nuestra vista. Con todo, apenas ocupan una zona restringida y próxima de la Vía Láctea. Si nos servimos del telescopio se nos ofrecerá un reino mucho más vasto, que brilla con la luz de miles de millones de galaxias. Pero el universo, nos dice la cosmología, careció de relieve y persistió oscuro durante un largo segmento de su historia primitiva. Las primeras estrellas no aparecieron hasta unos 100 millones de años después de la gran explosión (big bang). Transcurrieron casi mil millones de años antes de que abundaran las galaxias en el cosmos. ¿Cómo ocurrió esa transición de la oscuridad a la luz?

Los investigadores dedicados a su estudio han dando pasos importantes en el camino que nos lleva a la respuesta. Mediante técnicas refinadas de simulación por ordenador, han construido modelos sobre la posible evolución de las fluctuaciones de densidad resultantes de la gran explosión hacia las primeras estrellas. Además, las observaciones de los cuásares lejanos han permitido retrotraernos en el tiempo y analizar un breve momento de los últimos días de la "era cósmica oscura".

LA ESTRUCTURA COSMICA PRIMIGENIA adoptó la forma de una red de filamentos. Las primeras protogalaxias, sistemas de pequeña escala con diámetros de unos 30 a 100 años-luz, convergieron en los nodos de la red. Dentro de las protogalaxias, las regiones más densas se contrajeron para generar las primeras estrellas (*recuadro*).



De acuerdo con los nuevos modelos, las estrellas primigenias gozarían, a buen seguro, de masa y luminosidad notables. Su formación constituyó un acontecimiento crucial que alteró el universo y su evolución consiguiente. Esas estrellas cambiaron la dinámica del cosmos al calentar y ionizar el gas circundante. Las más precoces crearon y dispersaron los primeros elementos pesados, asentando así el camino que llevaría, con el tiempo, a la aparición de sistemas solares como el nuestro. La contracción o desplome ("colapso") de algunas estrellas primigenias podría haber sembrado el universo de agujeros negros supermasivos, que se formaron en el seno de las galaxias y se convirtieron en fuentes espectaculares de energía para los cuásares. En resumen, las estrellas primigenias hicieron posible el nacimiento de nuestro universo.

La edad oscura

Aunque el estudio del universo temprano adolece de la falta de observaciones directas, se ha podido examinar gran parte de la historia del universo al apuntar los telescopios hacia galaxias lejanas y cuásares que emitieron su luz hace miles de millones de años. Podemos inferir la edad de un objeto a partir del corrimiento hacia el rojo de su luz, lo que representa cuánto se ha expandido el universo desde que se emitiera esa luz. Los cuásares y galaxias más viejos que observamos ahora datan de unos mil millones de años después de la gran explosión (adoptando un valor actual para la edad del universo entre 12.000 y 14.000 millones de años). Los investigadores necesitarán mejores telescopios para ver objetos más alejados y cuyas edades correspondan a épocas anteriores.

Basándonos en la radiación del fondo de microondas, emitida unos 400.000 años después de la gran explosión, nos es dado, sin embargo, extraer determinadas conclusiones sobre el universo temprano. La uniformidad de la radiación de fondo prueba que la materia estaba homogéneamente distribuida en aquella época. Puesto que no había objetos luminosos grandes que perturbaran la "sopa" primordial, la materia debió permanecer homogénea y carente de estructuras durante los siguientes millones de años. A medida que el cosmos se expandía, la radiación de fondo se enrojecía hacia mayores longitudes de onda; el universo crecía cada vez más frío y oscuro. No hay observaciones de esa época oscura.

Aproximadamente mil millones de años después de la gran explosión, las galaxias brillantes y cuásares ya habían aparecido. Ello significa que las primeras estrellas se formaron algún tiempo antes. ¿Cuándo surgieron estos objetos luminosos iniciales?

Martin Rees, Abraham Loeb y muchos astrofísicos más han participado en la solución de estos problemas. Los estudios más recientes comienzan con los modelos cosmológicos estándar que describen la evolución del universo subsiguiente a la gran explosión. Aunque el universo temprano era sumamente homogéneo, la radiación de fondo presenta indicios de microfluctuaciones de densidad: grumos en la sopa primordial. De acuerdo con los modelos, esos grumos evolucionaron gradualmente hacia estructuras ligadas por gravedad. Primero se constituyeron sistemas pequeños, que, agrupados luego, originaron aglomeraciones de importancia. Las regiones más densas adoptaron una estructura reticular de filamentos, en los nodos de cuya red surgieron los primeros sistemas de formación de estrellas, unas pequeñas protogalaxias. De modo similar, las protogalaxias se unieron y nacieron las galaxias, que, a su vez, se congregaron en cúmulos. El proceso continúa en la actualidad: si bien la formación de galaxias está casi concluida, las galaxias se están todavía agrupando en cúmulos, que se distribuyen en una red filamentosa extendida por el universo entero.

Según los modelos cosmológicos, los primeros sistemas pequeños capaces de formar estrellas aparecieron transcurridos de 100 millones a 250 millones de años desde la gran explosión. Estas protogalaxias alcanzaron una masa que multiplicaba de cien mil a un millón de veces la solar; medirían entre 30 y 100 años-luz. Se trata de unas propiedades similares a las de las nubes de gas molecular donde se forman actualmente las estrellas en la Vía Láctea. Pero las protogalaxias primigenias presentaban peculiaridades específicas. Primero, constarían sobre todo de materia oscura, supuestas partículas elementales que componen, así se cree, hasta el 90 por ciento de la masa del universo. En las galaxias actuales la materia oscura está separada de la materia ordinaria: con el tiempo, la materia común se concentra en las regiones internas de la galaxia, mientras que la materia oscura permanece dispersa en un gran halo exterior. En las protogalaxias la materia ordinaria coexistía mezclada con la materia oscura.

Además, en las protogalaxias no habría cantidades significativas de elementos distintos del hidrógeno y el helio. La gran explosión produjo hidrógeno y helio; la mayor

Resumen/*Las estrellas primigenias*

- Las simulaciones por ordenador muestran que las estrellas primigenias irrumpieron a los 100-250 millones de años de la gran explosión. Se formaron en pequeñas protogalaxias que habían evolucionado a partir de fluctuaciones de densidad del universo.
- Puesto que las protogalaxias no contenían más elementos químicos que el hidrógeno y el helio, la física de la formación estelar favoreció el nacimiento de cuerpos increíblemente más pesados y luminosos que el Sol.
- La radiación de las estrellas primigenias ionizó el gas de hidrógeno circundante. Algunas estrellas explotaron constituidas en supernovas, dispersando por el universo los elementos pesados. Las estrellas más masivas se desplomaron en agujeros negros. A medida que las protogalaxias se mezclaban y unían para formar galaxias, los agujeros negros se concentraron en los centros galácticos.

parte de los elementos más pesados se crean sólo como producto de las reacciones de fusión termonuclear de las estrellas, por lo que no debieron estar presentes antes de que se formaran las primeras estrellas. Los astrónomos utilizan el término "metales" para designar estos elementos más pesados. Las estrellas jóvenes y ricas en metales de la Vía Láctea se llaman Población I estelar; las estrellas viejas y pobres en metales, Población II estelar. Las estrellas con ningún metal en absoluto —la generación primordial— configuran la Población III estelar.

En ausencia de metales, la física de los primeros sistemas de formación de estrellas es bastante más simple que la de las nubes de gas molecular de hoy día. Los propios modelos cosmológicos pueden facilitar, en principio, una descripción completa de las condiciones iniciales que precedieron a la primera generación de estrellas. Por el contrario, las estrellas engendradas en nubes de gas molecular nacen en medios complejos, alterados por la formación estelar anterior. Cabría, pues, resultar más sencillo modelar la formación de las primeras estrellas que las del presente. En cualquier caso, el problema requiere un estudio teórico. Varios grupos de investigación han ideado ya simulaciones por ordenador que ilustran la formación de las estrellas primigenias.

Al grupo integrado por Tom Abel, Greg Bryan y Michael L. Norman le debemos las simulaciones más realistas. Con la ayuda de Paolo Coppi nosotros hemos elaborado unas simulaciones basadas en hipótesis más sencillas, si bien encaminadas a explorar un amplio rango de posibilidades. Toru Tsuribe ha generado unos cálculos similares utilizando ordenadores más potentes. Una simulación aún más idealista es la de Fumitaka Nakamura y Masayuki Umemura, con unos resultados muy instructivos. Aunque estos estudios difieren en varios detalles, todos han producido descripciones similares sobre la formación de las estrellas primigenias.

Y se hizo la luz

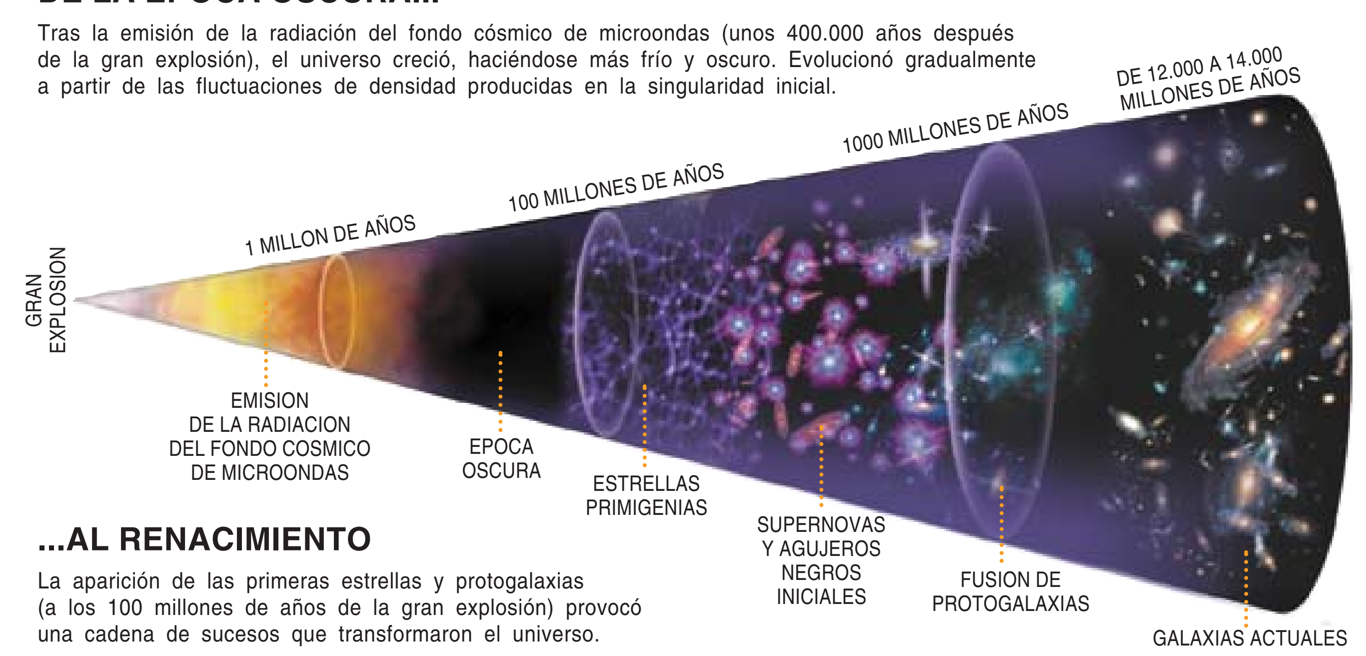
Las simulaciones muestran que las nubes de gas primordial se originaron en los nodos de una red de filamentos de pequeña escala; después, comenzaron a contraerse por su propia gravedad. La compresión debió haber calentado el gas hasta temperaturas por encima de los 1000 kelvin. Algunos átomos de hidrógeno se combinaron en el gas caliente y denso, creando trazas de hidrógeno molecular. Las moléculas de hidrógeno empezaron a enfriar las partes más densas del gas al emitir radiación infrarroja, tras colisionar con los átomos de hidrógeno. La temperatura de estas regiones más densas cayó hasta los 200 o 300 kelvin, relajando la presión del gas y permitiendo el desplome gravitatorio del gas en grumos.

Este enfriamiento desempeñó una función esencial, pues posibilitó que la materia común del sistema primordial se separase de la materia oscura. El hidrógeno frío se asentaba en una base plana y giratoria con forma grumosa y de filamentos, posiblemente con estructura de disco. Puesto que las partículas de la materia oscura no emiten radiación ni pierden energía, permanecerían dispersas en la nube primordial. En breve, el sistema de formación estelar se pareció a una galaxia en miniatura, con un disco de materia ordinaria y un halo de materia oscura. Dentro del disco,

LA LINEA COSMICA DEL TIEMPO

DE LA EPOCA OSCURA...

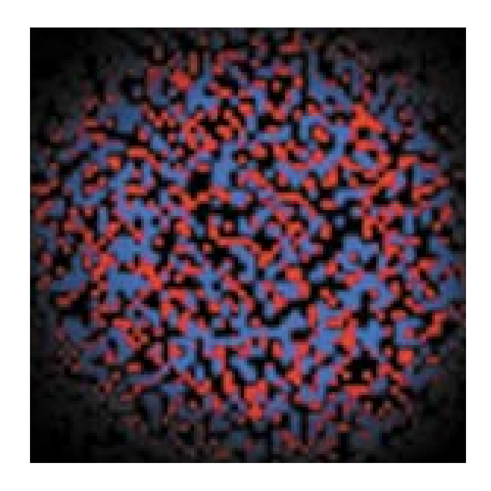
Tras la emisión de la radiación del fondo cósmico de microondas (unos 400.000 años después de la gran explosión), el universo creció, haciéndose más frío y oscuro. Evolucionó gradualmente a partir de las fluctuaciones de densidad producidas en la singularidad inicial.



...AL RENACIMIENTO

La aparición de las primeras estrellas y protogalaxias (a los 100 millones de años de la gran explosión) provocó una cadena de sucesos que transformaron el universo.

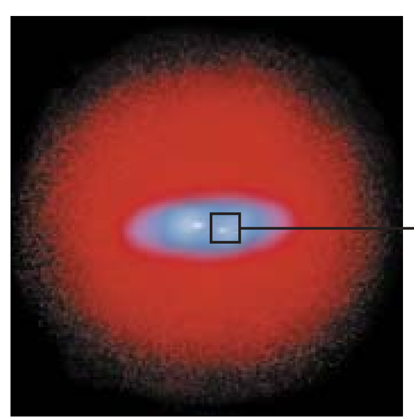
NACIMIENTO Y MUERTE DE LAS ESTRELLAS PRIMIGENIAS

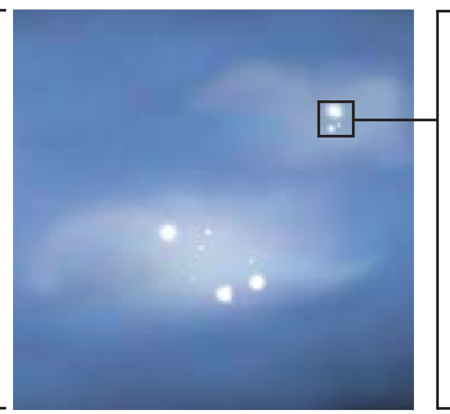


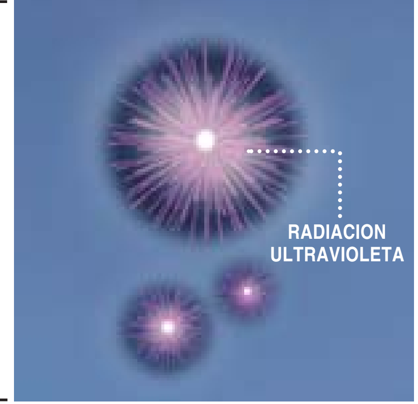
AGITACION ANCESTRAL

El proceso que desembocó en la creación de las estrellas primordiales difirió mucho de la formación estelar del presente. Ello no obstante, las muertes violentas de algunas de estas estrellas prepararon el camino para el advenimiento del universo que vemos hoy.

1 Los primeros sistemas de formación de estrellas —pequeñas protogalaxias— constaban sobre todo de las partículas elementales conocidas como materia oscura (*color rojo*). La materia común —gas de hidrógeno (*azul*)— estaba en un principio mezclada con materia oscura.



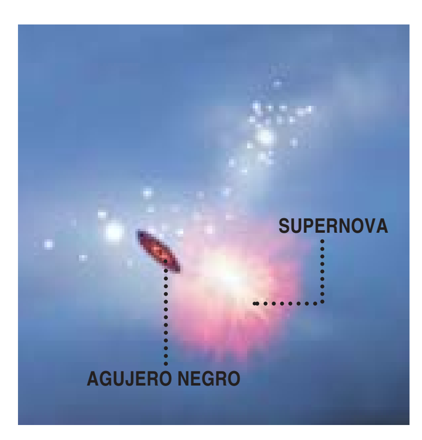


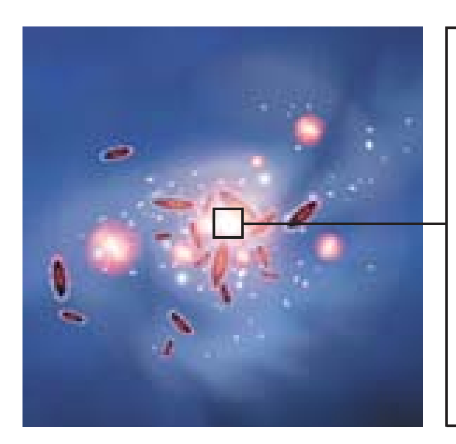


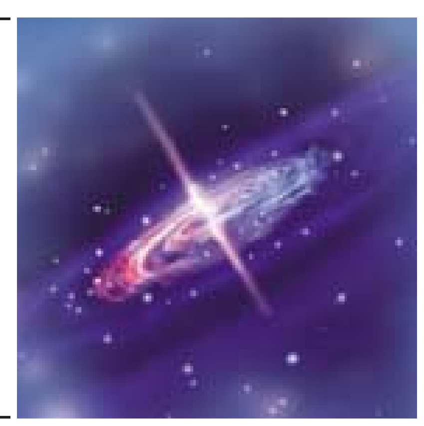
2 El enfriamiento del hidrógeno permitió la contracción de materia común, mientras que la materia oscura permaneció dispersa. El hidrógeno se asentó en un disco en el centro de la protogalaxia.

3 Las regiones más densas del gas se contrajeron en grumos formadores de estrellas; la masa de cada una centuplicaba varias veces la solar. Algunos grumos de éstos se contrajeron para engendrar estrellas muy pesadas y luminosas.

4 La radiación ultravioleta procedente de las estrellas ionizó el gas de hidrógeno neutro circundante. A medida que aumentaba el número de estrellas, las burbujas de gas ionizado se mezclaron y fusionaron; el gas intergaláctico terminó por ionizarse del todo.







5 Transcurridos unos millones de años, al final de su vida breve, algunas de las primeras estrellas explotaron constituidas en supernovas. Las portadoras de masa mayor se desplomaron en agujeros negros.

6 La atracción gravitatoria empujó a las protogalaxias una contra otra. Con bastante verosimilitud, las colisiones avivaron la formación estelar, a la manera en que se produce hoy la fusión galáctica.

7 Los agujeros negros posiblemente se fusionaron para formar un agujero negro supermasivo en el centro de la protogalaxia. El gas que se arremolinó en torno a ese agujero podría haber generado una radiación parecida a la de los cuásares.

los grumos más densos de gas continuaron su contracción gravitatoria; andando el tiempo, algunos de ellos sufrieron una contracción descontrolada convirtiéndose en estrellas.

Los primeros sistemas de formación estelar eran mucho más calientes que las nubes de gas molecular donde nacen hoy la mayoría de las estrellas. Los granos de polvo y las moléculas que contienen elementos pesados han enfriado las nubes del presente hasta temperaturas de sólo unos 10 kelvin. A la masa mínima que un grumo gaseoso o nebulosa debe tener para contraerse por su propia gravedad se la conoce por masa de Jeans; es directamente proporcional al cuadrado de la temperatura del gas e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión gaseosa. Los sistemas primigenios de formación de estrellas debieron tener presiones similares a las nubes moleculares actuales. Ahora bien, puesto que las temperaturas de los primeros grumos de gas en contracción eran casi 30 veces superiores que las temperaturas de las nubes moleculares, su masa de Jeans debió haber sido unas 1000 veces mayor.

En las nubes moleculares de las regiones más próximas de la Vía Láctea, la masa de Jeans es prácticamente igual a la masa del Sol, valor que comparten las masas de los grumos preestelares observados en estas nubes. Si escalamos por un factor 1000, podemos estimar que las masas de los primeros sistemas de formación de estrellas debieron tener de 500 a 1000 masas solares. De acuerdo con esta predicción, todas las simulaciones por ordenador antes mencionadas mostraban la creación de grumos con masas del orden de varios cientos la masa solar o mayores.

A tenor de nuestros cálculos, las masas predichas para los grumos primigenios no vendrían determinadas por las condiciones cosmológicas adoptadas (pensemos en la naturaleza exacta de las fluctuaciones iniciales de densidad). De hecho, tales masas dependen sobre todo de la física del hidrógeno molecular y, en menor medida, dependen del modelo cosmológico o de la técnica de simulación. Por varias razones. En primer lugar, el hidrógeno molecular no puede enfriar el gas por debajo de los 200 kelvin, constituyendo a éste en el límite inferior de la temperatura de los primeros grumos de formación estelar. En segundo lugar, el enfriamiento del hidrógeno molecular resulta ineficiente en las densidades más altas encontradas cuando se inició la contracción de los grumos. En estas densidades, las moléculas de hidrógeno chocan contra otros átomos antes de que tengan tiempo suficiente para emitir un fotón infrarrojo; esto aumenta la temperatura del gas y frena la contracción hasta que los grumos han alcanzado por lo menos unos pocos cientos de masas solares.

¿Cuál fue la suerte de los primeros grumos que se desplomaron? ¿Formaron estrellas de masas de tamaños parejos o se fragmentaron más para crear estrellas de menor masa? Los diversos equipos de investigación han llevado sus cálculos hasta el punto en que los grumos evolucionan por sí mismos para dar lugar a las estrellas. Ninguna de las simulaciones ha revelado ninguna tendencia a la fragmentación. Semejante planteamiento concuerda con la explicación de la formación estelar hoy; las observaciones y las simulaciones muestran que la fragmentación de los grumos de formación estelar se limita a la creación de sistemas binarios (dos estrellas que orbitan una alrededor de la otra). Por lo que parece, la fragmentación resultaría incluso menos probable en los grumos primordiales, dado que la ineficiencia del enfriamiento del hidrógeno molecular mantendría bastante alta la masa de Jeans. Las simulaciones, sin embargo, aún no han determinado con precisión el resultado final del desplome y, por ende, no puede descartarse la formación de sistemas binarios.

A propósito de la masa alcanzada por las estrellas primigenias discrepan los grupos. Según Abel, Bryan y Norman esas estrellas no tendrían más de 300 masas solares. En cambio, creemos nosotros que podrían haber existido masas de 1000 veces la solar. Ambas predicciones son válidas bajo diferentes circunstancias: las genuinas estrellas primordiales podrían haber tenido masas no mayores que 300 masas solares, mientras que las estrellas que se formaron un poco después, a partir de la contracción de protogalaxias mayores, podrían haber alcanzado valores más altos. Debido a los efectos de retroalimentación tales predicciones cuantitativas resultan difíciles; cuando una estrella masiva nace, genera una radiación muy intensa y expulsa materia que puede arrasar parte del gas de un grumo en colapso. No obstante, estos efectos dependen de la presencia de elementos pesados en el gas; debe, pues, esperarse que sean menos importantes en las estrellas más tempranas. Por tanto, parece seguro concluir que las primeras estrellas del universo fueron increíblemente más masivas y luminosas que el Sol.

El renacimiento cósmico

¿Qué efecto ejercieron las estrellas primordiales en el resto del universo? Propio de las estrellas sin metales es poseer una temperatura superficial más alta que las estrellas de composiciones parecidas al Sol. La producción de energía nuclear en el centro de una estrella resulta menos eficiente si no hay metales; la estrella debería ser más caliente y compacta para contrarrestar la gravedad. En razón de la estructura más compacta, las capas superficiales de la estrella serían también más calientes. En colaboración con Rolf-Peter Kudritzki y Abraham Loeb, uno de los autores (Bromm) ha diseñado modelos teóricos para estas estrellas con masas entre 100 y 1000

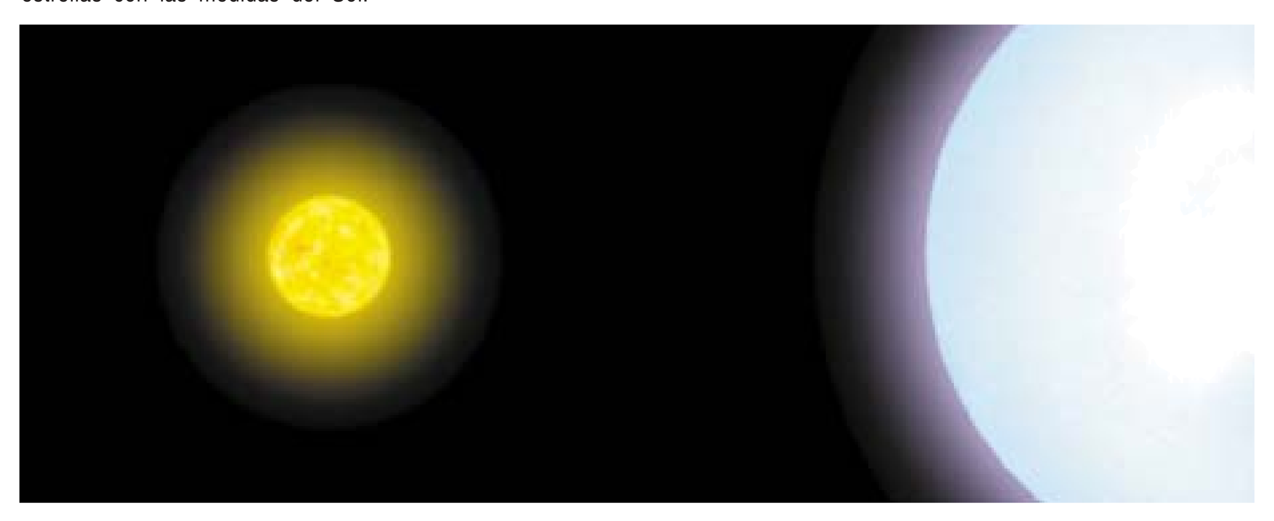
Los autores

RICHARD B. LARSON y VOLKER BROMM han venido estudiando juntos los procesos que dieron fin a la "época oscura" del universo y contribuyeron al nacimiento de las primeras estrellas. Larson, docente de astronomía en la Universidad de Yale, reside en esa institución desde 1968. Goza de prestigio en el ámbito de las teorías sobre formación estelar y evolución galáctica. Bromm, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, se ocupa del análisis de la estructura cósmica.

ESTADISTICA ESTELAR

CARACTERISTICAS COMPARADAS

Con las simulaciones por ordenador se han obtenido las posibles masas, tamaños y otras propiedades de las estrellas primigenias. Las columnas inferiores comparan las mejores estimaciones de las primeras estrellas con las medidas del Sol.



SOL

MASA: $1{,}989 \times 10^{30}$ kilogramos
RADIO: 696.000 kilómetros
LUMINOSIDAD: $3{,}85 \times 10^{23}$ kilowatt
TEMPERATURA SUPERFICIAL: 5780 kelvin
TIEMPO DE VIDA: 10.000 millones de años

ESTRELLAS PRIMIGENIAS

MASA: de 100 a 1000 masas solares
RADIO: de 4 a 14 radios solares
LUMINOSIDAD: de un millón a 30 millones en unidades solares
TEMPERATURA SUPERFICIAL: DE 100.000 a 110.000 kelvin
TIEMPO DE VIDA: 3 millones de años

masas solares. De acuerdo con los mismos, se registrarían unas temperaturas de superficie de unos 100.000 kelvin, casi 17 veces más altas que la temperatura superficial del Sol. Por tanto, la primera luz estelar del universo correspondería a la radiación ultravioleta procedente de estrellas muy calientes; debería haber empezado a calentar y ionizar el gas de hidrógeno y helio neutros que circundaba a esas estrellas, en cuanto emergieron.

A este suceso lo hemos dado en llamar renacimiento cósmico. Aunque los astrónomos no pueden estimar la cantidad de gas que se condensó en las estrellas primigenias, habría bastado una fracción de sólo una parte en 100.000 para que ionizaran, en buena medida, el gas restante. Una vez que las estrellas primigenias comenzaron a brillar, se formó alrededor de cada una de ellas una burbuja creciente de gas ionizado. En el transcurso de cientos de millones de años fueron apareciendo más y más estrellas, las burbujas de gas ionizado terminaron por mezclarse y fusionarse, hasta que el gas intergaláctico se ionizó por completo.

Expertos del Instituto de Tecnología de California y del Servicio Sloan de Inspección Digital del Firmamento han hallado pruebas de las fases finales de este proceso de ionización. Observaron intensas absorciones en la luz ultravioleta de los espectros de cuásares que datan de unos 900 millones de años después de la gran explosión. En línea con tales resultados, las últimas trazas de gas de hidrógeno neutro se ionizarían por esa época. El helio requiere más energía para ionizarse que el hidrógeno; ahora bien, si las estrellas primigenias gozaron de la masa que se les atribuye, ionizarían hidrógeno y helio al mismo tiempo.

Si las estrellas primigenias no fueron tan masivas, el helio debería haberse ionizado más tarde por la radiación energética de otras fuentes, por cuásares. Las observaciones venideras de los objetos lejanos ayudarán a determinar cuándo se ionizó el helio cósmico.

Además, si las estrellas primordiales gozaron de una masa poderosa, habrían vivido sólo unos pocos millones de años. Algunas de las estrellas habrían explotado constituidas en supernovas al final de su vida, expulsando los metales fabricados en las reacciones de fusión. Las estrellas que superan de 100 a 250 veces la masa solar revientan en explosiones muy enérgicas. Algunas de las primigenias alcanzarían masas de ese rango. Puesto que los metales son más eficientes que el hidrógeno en el enfriamiento de las nubes moleculares, permiten que éstas se desplomen para formar estrellas; en consecuencia, la producción y dispersión de incluso una pequeña cantidad metálica podría haber ejercido un efecto considerable en la formación estelar.

En colaboración con Andrea Ferrara hemos encontrado que, cuando la abundancia de metales en una nube de formación estelar crece por encima de la milésima parte de la metalicidad del Sol, los me-

tales enfrían presto el gas hasta la temperatura de la radiación cósmica de fondo. (Esta temperatura decae a medida que el universo se expande; mil millones de años después de la gran explosión era de 19 kelvin y, hoy, de 2,7 kelvin.) Un proceso de enfriamiento tan eficiente permite la creación de estrellas con masas menores, lo que podría haber constituido un acicate para acelerar la tasa de nacimiento estelar. Cabe la posibilidad de que, hasta la aparición de la primera generación de metales, no se acelerara el ritmo de formación estelar. En este caso, la segunda generación de estrellas podría haber sido la verdadera responsable de la iluminación del universo y del renacimiento cósmico.

Al comienzo del período activo del nacimiento de una estrella, la temperatura del fondo cósmico podría haber sido superior a la temperatura de las nubes moleculares de hoy (10 kelvin). Hasta que la temperatura no cayó a tal nivel —lo que ocurrió unos 2000 millones de años después de la gran explosión—, el proceso de formación estelar pudo haber favorecido a las estrellas masivas. Como resultado, un gran número de éstas nacieron durante las primeras fases de formación de la galaxia mediante fusiones sucesivas de protogalaxias. Un fenómeno similar ocurre ahora en el universo al colisionar dos galaxias: desencadenan un brote de formación estelar, es decir, un incremento repentino del ritmo de formación de estrellas. Aunque tales sucesos son hoy escasos, parecen capaces de producir una cifra importante de estrellas masivas.

Datos desconcertantes

Esta hipótesis sobre la primera formación de estrellas podría ayudar a explicar algunas características desconcertantes del universo actual. Ignoramos por qué las galaxias contienen un número de estrellas pobres en metales menor del que cabe esperar de un ritmo proporcional de formación estelar. La discrepancia podría resolverse si la formación primordial hubiera producido sólo estrellas muy masivas; al morir, estas estrellas habrían dispersado grandes cantidades de metales, luego incorporados directamente en las estrellas menos masivas de hoy.

Otro rasgo paradójico lo observamos en la notable concentración de metales en el gas intergaláctico emisor en rayos X que hay en los cúmulos de galaxias. Ese fenómeno admitiría fácil justificación si hubiera habido un período temprano de rápida formación de estrellas masivas y, en consecuencia, una tasa elevada de supernovas que enriquecieran químicamente el gas intergaláctico. Un ritmo intenso de supernovas en una época temprana encaja también con recientes indicios de que la mayor parte de la materia común y los metales del universo residen en el medio difuso intergaláctico, no en las propias galaxias. Para producir semejante distribución de materia, la formación de galaxias debió haber sido un proceso espectacular, donde convergieran brotes intensos de formación de estrellas muy masivas y cascadas de supernovas que expulsaron gas y metales lejos de las galaxias.

Las estrellas cuya masa multiplica 250 veces la solar no explotan al final de sus vidas; antes bien, se contraen en agujeros negros de similar masa. Varias de las simulaciones por ordenador mencionadas conceden una masa semejante a algunas de las estrellas primigenias. Puesto que las estrellas primordiales se formaron en las regiones más densas del universo, cualquier agujero negro resultante del desplome de las mismas se incorporaría, mediante procesos de mezcla y fusión, en sistemas de un tamaño creciente. Es posible que algunos de estos agujeros negros se concentraran en pleno interior de las galaxias grandes y sirvieran de semilla de los agujeros negros supermasivos —millones de veces más pesados que el Sol— que se encuentran hoy en los núcleos galácticos.

A mayor abundamiento, los astrónomos piensan que la fuente de energía de los cuásares es el gas que se arremolina en los agujeros negros del centro de las galaxias. Si se hubieran formado agujeros negros menores en los centros de algunas de las protogalaxias primigenias, la acreción de materia en los agujeros podría habría generado "minicuásares". De presentarse, pues, esos objetos justo después de las primeras estrellas, podrían haber supuesto una fuente adicional de luz y de radiación ionizante en los momentos iniciales.

En resumen, disponemos de un cuadro coherente de la historia precoz del universo, aunque ciertos detalles permanezcan todavía en el terreno de la especulación. La formación de las primeras estrellas y protogalaxias desencadenó un proceso de evolución cósmica. Por lo que sabemos, el período más intenso de formación de estrellas, galaxias y actividad de cuásares se desarrolló unos miles de millones de años después de la gran explosión; todos estos fenómenos habrían continuado hasta hoy con ritmo decreciente a medida que envejece el universo. La arquitectura cósmica se ha desplazado ahora hacia mayores escalas conforme las galaxias se van congregando en cúmulos.

Es de esperar seguir avanzando en el conocimiento de las primeras etapas de la historia, cuando las estructuras comenzaron a desarrollarse a pequeña escala. Puesto que las estrellas primordiales fueron probablemente muy masivas y brillantes, los instrumentos a bordo del Telescopio Espacial de Próxima Generación —el sucesor del Telescopio Espacial Hubble— podrían detectar algunos de estos cuerpos ancestrales. Llegado ese momento, los astrónomos tendrán pruebas directas del mecanismo en cuya virtud un cosmos oscuro y sin estructuras generó el abanico brillante de objetos que hoy nos dan luz y vida.

Bibliografía complementaria

THE FORMATION OF THE FIRST STARS. Richard B. Larson en *Star Formation from the Small to the Large Scale*. Dirigido por F. Favata, A. A. Kaas y A. Wilson. ESA Publications, 2000.

IN THE BEGINNING: THE FIRST SOURCES OF LIGHT AND THE REIONIZATION OF THE UNIVERSE. R. Barkana y A. Loeb en *Physics Reports*, vol. 349, n.º 2, págs. 125-238; julio de 2001.



La biología en el último cuarto de siglo

José María Valderas

Es un tópico cierto que el artículo publicado en abril de 1953 por Francis Crick y James D. Watson sobre la estructura en doble hélice del ácido desoxirribonucleico (ADN) puso a la biología en sus justos raíles moleculares. De acuerdo con lo predicho por Erwin Schrödinger, la molécula de ADN era un cristal aperiódico. Lo componían cuatro bases nucleotídicas, donde, a lo largo de sus cadenas, se emparejaban adenosina con timina, guanosina con citosina, dando sentido a una correspondencia que había establecido Erwin Chargaff. Tal disposición explicaba el mecanismo de copia de la información y los errores posibles, por mutación, en el proceso. Con la sobria parquedad de los hitos históricos, Watson y Crick aportaban la solución de los problemas centrales de la genética. "No se nos escapa —afirmaban— que el emparejamiento específico que hemos postulado sugiere de inmediato un posible mecanismo de copia del material genético."

Antes de que pasaran veinte años, se elucidaron la replicación del ADN, la transcripción de ADN en ARN, la síntesis de proteínas, la linealidad del código en tripletes y los mecanismos de regulación génica. Sobre todo, el concepto de triplete. Este trío lector continuo, sin solapamiento, constituía otro pilar básico con que Crick despedía, en un segundo famoso artículo, el año 1961: al conocimiento aceptado de que la secuencia aminoacídica de la cadena polipeptídica venía determinada por bases consecutivas del ácido nucleico en una correspondencia sin solapamiento de nucleótidos, el trabajo de marras añadía el triplete de bases codificador de un aminoácido; además, quedaba establecido que se trataba de una lectura sin puntos de corte, desde un inicio fijo.

Por la senda segura

Se coronaba así un siglo de tenaz investigación, que había empezado Gregor Mendel en su huerta monacal cruzando variedades de guisantes y anotando los "factores" de interés. Al poco, los microscopistas descubrieron que los óvulos fecundados portaban dos "pronúcleos", que terminaban por fundirse. En el núcleo se distinguían los cromosomas, perceptibles con las nuevas técnicas de tinción. ¿Qué relación había entre herencia y cromosomas?

En los primeros meses de 1900, Hugo de Vries, Erich Tschermak von Seysenegg y Karl Correns redescubrieron las leyes de Mendel. Dos años después, Walter Sutton revela la conexión entre cromosomas y "factores" de Mendel. La ciencia de la genética alcanzaba así el nivel subcelular. Faltaba encontrar un organismo manipulable con el que la experimentación procediera con celeridad. Thomas Hunt Morgan lo halló, en 1910, en una mosca del género *Drosophila*. En su laboratorio de la Universidad de Columbia se demostró que algunos caracteres estaban ligados al sexo; allí se confirmó también que ciertos genes se alojaban en cromosomas específicos. Alfred Sturtevant describió la frecuencia con que se cotransmitían pares de genes cuando pasaban del progenitor a la descendencia. Levantó un mapa lineal, sencillo, donde los genes próximos se cotransmitían más a menudo que los distantes entre sí. La cartografía génica se convirtió en poderosa herramienta de la genética.

A principios del siglo XX florece también la bioquímica, ciencia que se esforzó por entender la vida mediante el aislamiento de moléculas y la reconstitución de los procesos fisiológicos en extractos inertes. Hacia 1925 se había demostrado que muchas reacciones bioquímicas podían reproducirse en el tubo de ensayo gracias a unos catalizadores orgánicos, las enzimas. Sin embargo, los genes parecían inaccesibles. ¿Cómo purificar la herencia en un tubo de ensayo?

Un primer paso se dio en 1927 con el trabajo de Hermann Muller. Descubrió que la aplicación de rayos X provocaba mutaciones en los genes de la mosca. Los genéticos vieron en las irradiaciones un nuevo útil que les liberaba de la obligada dependencia de las mutaciones espontáneas. Y, no menos importante, quedaba claro que los genes eran entidades físicas, expuestas a alteraciones. ¿Qué tipos de moléculas explicaban la herencia? Entró cierta luz cuando, un año más tarde, Fred Griffith observó que una cepa viru-

La aparición de nuevas técnicas —pinzamiento de membrana, secuenciación automática y procesos avanzados de observación y formación de imágenes—, sumada al creciente conocimiento molecular de las estructuras biológicas, han acelerado el desarrollo de las ciencias de la vida en los últimos 25 años

lenta de *Pneumoccocus pneumoniae* transmitía su carácter patógeno a una cepa benigna. ¿En qué consistía ese "principio transformante"?

No se conoció hasta 1944. Oswald Avery, Colin McLeod y Maclyn McCarty resolvieron en un trabajo de exquisito descarte que se trataba de moléculas de ácido desoxirribonucleico. La tesis recibió un sólido espaldarazo, en el decenio siguiente, al demostrar Alfred Hershey y Martha Chase que, cuando los virus bacterianos inyectaban su información genética en las células huésped, penetraba sólo el ADN, quedándose fuera de la célula su cubierta proteica. En 1952 Rosalin Franklin obtiene por difracción de rayos X datos sobre el ADN, que resultarían decisivos para la elucidación de la estructura molecular del ADN.

Tras el anuncio de Watson y Crick, los análisis de sistemas bacterianos avanzan raudos. En diez años, quedaba establecido lo que habría de conocerse por dogma central de la biología molecular: el flujo de información partía del ADN, se transcribía en ARN y se traducía en proteínas. El segmento de ADN correspondiente a cada gen se copia en una molécula de ARN mensajero, cuya secuencia de bases se utiliza luego para dirigir la síntesis de una proteína específica a partir de bloques constructivos de aminoácidos. No había razón para no extrapolar a los eucariotas los procesos de expresión génica observados en bacterias. En palabras de Jacques Monod, "lo que era verdad para *Escherichia coli*, lo era para el elefante".

A finales de los sesenta Jonathan Beckwith aísla un gen bacteriano, el primero, cuya proteína cifrada interviene en el metabolismo del azúcar. Y en 1970, Howard Temin y David Baltimore descubren que ciertos virus de ARN utilizan la transcripción inversa (de ARN en ADN reconstituido) como parte de su ciclo reproductor.

ADN y ARN

Los años setenta suponen otro salto cualitativo gracias al desarrollo de dos técnicas del ADN recombinante: la clonación y la secuenciación. En 1972, Herbert Bo-

1. EL FAMOSO ARTICULO de James D. Watson y Francis Crick, aparecido en la revista *Nature* en abril de 1953, llevaba todavía el título de ambición general propio de la época. Respondía, sin embargo, plenamente al contenido.

MOLECULAR STRUCTURE OF NUCLEIC ACIDS

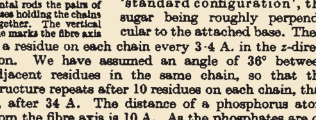
A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid

WE wish to suggest a structure for the salt of deoxyribose nucleic acid (D.N.A.). This structure has novel features which are of considerable biological interest.

A structure for nucleic acid has already been proposed by Pauling and Corey[1]. They kindly made their manuscript available to us in advance of publication. Their model consists of three intertwined chains, with the phosphates near the fibre axis, and the bases on the outside. In our opinion, this structure is unsatisfactory for two reasons: (1) We believe that the material which gives the X-ray diagrams is the salt, not the free acid. Without the acidic hydrogen atoms it is not clear what forces would hold the structure together, especially as the negatively charged phosphates near the axis will repel each other. (2) Some of the van der Waals distances appear to be too small.

Another three-chain structure has also been suggested by Fraser (in the press). In his model the phosphates are on the outside and the bases on the inside, linked together by hydrogen bonds. This structure as described is rather ill-defined, and for this reason we shall not comment on it.

We wish to put forward a radically different structure for the salt of deoxyribose nucleic acid. This structure has two helical chains each coiled round the same axis (see diagram). We have made the usual chemical assumptions, namely, that each chain consists of phosphate diester groups joining β-D-deoxyribofuranose residues with 3',5' linkages. The two chains (but not their bases) are related by a dyad perpendicular to the fibre axis. Both chains follow right-handed helices, but owing to the dyad the sequences of the atoms in the two chains run in opposite directions. Each chain loosely resembles Furberg's[2] model No. 1; that is, the bases are on the inside of the helix and the phosphates on the outside. The configuration of the sugar and the atoms near it is close to Furberg's 'standard configuration', the sugar being roughly perpendicular to the attached base. There is a residue on each chain every 3·4 A. in the z-direction. We have assumed an angle of 36° between adjacent residues in the same chain, so that the structure repeats after 10 residues on each chain, that is, after 34 A. The distance of a phosphorus atom from the fibre axis is 10 A. As the phosphates are on the outside, cations have easy access to them.



This figure is purely diagrammatic. The two ribbons symbolize the two phosphate—sugar chains, and the horizontal rods the pairs of bases holding the chains together. The vertical line marks the fibre axis

The structure is an open one, and its water content is rather high. At lower water contents we would expect the bases to tilt so that the structure could become more compact.

The novel feature of the structure is the manner in which the two chains are held together by the purine and pyrimidine bases. The planes of the bases are perpendicular to the fibre axis. They are joined together in pairs, a single base from one chain being hydrogen-bonded to a single base from the other chain, so that the two lie side by side with identical z-co-ordinates. One of the pair must be a purine and the other a pyrimidine for bonding to occur. The hydrogen bonds are made as follows: purine position 1 to pyrimidine position 1; purine position 6 to pyrimidine position 6.

If it is assumed that the bases only occur in the structure in the most plausible tautomeric forms (that is, with the keto rather than the enol configurations) it is found that only specific pairs of bases can bond together. These pairs are: adenine (purine) with thymine (pyrimidine), and guanine (purine) with cytosine (pyrimidine).

In other words, if an adenine forms one member of a pair, on either chain, then on these assumptions the other member must be thymine; similarly for guanine and cytosine. The sequence of bases on a single chain does not appear to be restricted in any way. However, if only specific pairs of bases can be formed, it follows that if the sequence of bases on one chain is given, then the sequence on the other chain is automatically determined.

It has been found experimentally[3,4] that the ratio of the amounts of adenine to thymine, and the ratio of guanine to cytosine, are always very close to unity for deoxyribose nucleic acid.

It is probably impossible to build this structure with a ribose sugar in place of the deoxyribose, as the extra oxygen atom would make too close a van der Waals contact.

The previously published X-ray data[5,6] on deoxyribose nucleic acid are insufficient for a rigorous test of our structure. So far as we can tell, it is roughly compatible with the experimental data, but it must be regarded as unproved until it has been checked against more exact results. Some of these are given in the following communications. We were not aware of the details of the results presented there when we devised our structure, which rests mainly though not entirely on published experimental data and stereochemical arguments.

It has not escaped our notice that the specific pairing we have postulated immediately suggests a possible copying mechanism for the genetic material.

Full details of the structure, including the conditions assumed in building it, together with a set of co-ordinates for the atoms, will be published elsewhere.

We are much indebted to Dr. Jerry Donohue for constant advice and criticism, especially on interatomic distances. We have also been stimulated by a knowledge of the general nature of the unpublished experimental results and ideas of Dr. M. H. F. Wilkins, Dr. R. E. Franklin and their co-workers at King's College, London. One of us (J. D. W.) has been aided by a fellowship from the National Foundation for Infantile Paralysis.

J. D. WATSON
F. H. C. CRICK

Medical Research Council Unit for the Study of the Molecular Structure of Biological Systems,
Cavendish Laboratory, Cambridge.

April 2.

[1] Pauling, L., and Corey, R. B., *Nature*, 171, 346 (1953); *Proc. U.S. Nat. Acad. Sci.*, 39, 84 (1953).
[2] Furberg, S., *Acta Chem. Scand.*, 6, 634 (1952).
[3] Chargaff, E., for references see Zamenhof, S., Brawerman, G., and Chargaff, E., *Biochim. et Biophys. Acta*, 9, 402 (1952).
[4] Wyatt, G. R., *J. Gen. Physiol.*, 36, 201 (1952).
[5] Astbury, W. T., Symp. Soc. Exp. Biol. 1, Nucleic Acid, 66 (Camb. Univ. Press, 1947).
[6] Wilkins, M. H. F., and Randall, J. T., *Biochim. et Biophys. Acta*, 10, 192 (1953).

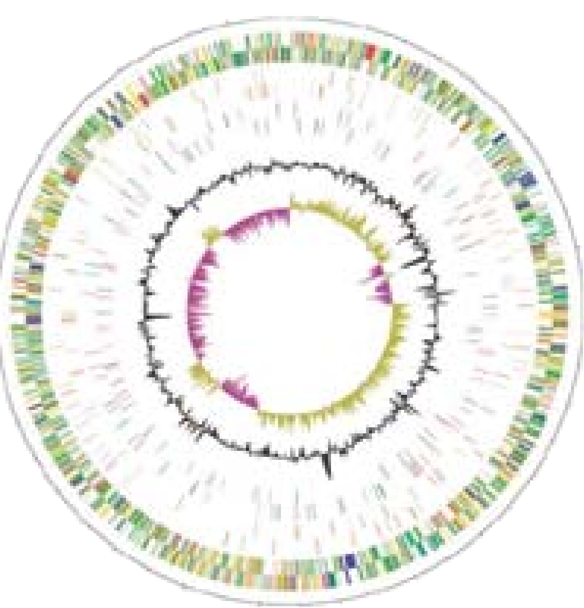
171, 737; 1953

yer y Paul Berg utilizan enzimas de restricción para producir las primeras moléculas de ADN recombinante, es decir, de un híbrido del ADN celular y el de un vector. Con la clonación se introducía un nuevo giro en la purificación: se troceaban genomas; cada fragmento se agregaba a un vector, que entraba en la célula bacteriana y ésta, al multiplicarse, reproducía el ADN foráneo. Las bacterias descendientes formaban de ese modo un clon. Del clon se pasó a la "biblioteca de genes", una vez purificados los distintos segmentos del genoma de partida. Virus y plásmidos se convirtieron en los vectores imprescindibles. Completaríase la clonación con las técnicas de secuenciación elaboradas por Fred Sanger y Walter Gilbert, que permitían determinar fragmentos de ADN de varios cientos de bases.

Pero esa revolución del ADN recombinante no hubiera sido posible sin el concurso de productos refinados a lo largo de miles de millones de años de evolución natural —replicasas, enzimas de restricción, etcétera—, unas herramientas químicas precisas y delicadas que operaban sobre ácidos nucleicos. En 1973 Stanley Cohen y Herbert Boyer inician la también llamada ingeniería genética insertando un gen extraído de una rana africana en ADN bacteriano.

En los eucariotas, sin embargo, las cosas no resultaban fáciles. Hasta que se abandonó el prejuicio de Monod, firmemente asentado entre la comunidad científica. No era lo mismo la bacteria que el elefante. El quid estaba en los ribosomas. Constan éstos de una subunidad grande y de otra menor, que, juntas, orquestan las etapas de iniciación, elongación y terminación de la síntesis proteica. En 1975 se comprobó que el extremo 3' del ARN ribosómico de 16S de la subunidad pequeña se apareaba con ARNm durante el inicio de la traducción en bacterias. Dos años después se descubría la existencia de los intrones y la maduración y reparación del ARN. Dicho de otro modo, en los eucariotas los genes no eran siempre colineales con su ARNm y productos proteicos, sino que estaban interrumpidos por "secuencias intercaladas", o "intrones", de ADN no codificador.

Los genes de corte y empalme implicados se transcriben inicialmente *in toto* para dar un ARN precursor colineal, procesado luego para eliminar el intrón y generar el ARN funcional, trátese de ARN mensajero, ARN de transferencia o ARN ribosómico. Ahora bien, si los intrones deben eliminarse de los transcriptos génicos antes de su exportación al citoplasma, ¿con qué mecanismos celulares se cuenta para llevar a cabo esa tarea? En 1979 llegó la respuesta: con unas ribonucleoproteínas nucleares y pequeñas (snRNP). Desde 1998 sabemos que cinco micropartículas de ésas y varios factores proteicos se ensamblan para formar un somite cirujano (en barbarismo frecuente, "espliceosoma"), donde se acomete la remoción de intrones a partir del ARN premensajero.



2. GENOMA de la bacteria de la peste, *Yersinia pestis*. Consta de 4012 genes.

La molécula de ARN guardaba otra sorpresa espectacular, la catálisis por ARN, descubierta por Thomas R. Cech en 1982. La actividad catalítica de la ribozima desató un torrente de especulaciones sobre el papel del ARN en el origen de la vida: si las dos características fundamentales de un sistema biológico son el almacenamiento de la información y la capacidad para replicar ésta, el ARN mostraba ser la única macromolécula facultada para acometer ambas funciones; la vida empezaría con un ARN autorreplicante en tanto que las proteínas y el ADN harían su entrada más adelante, afianzado ya el mundo de ARN. Otro hito, de 1986, fue la comprobación del papel autocorrector que desempeñaba la molécula de ARN.

Del gen al genoma

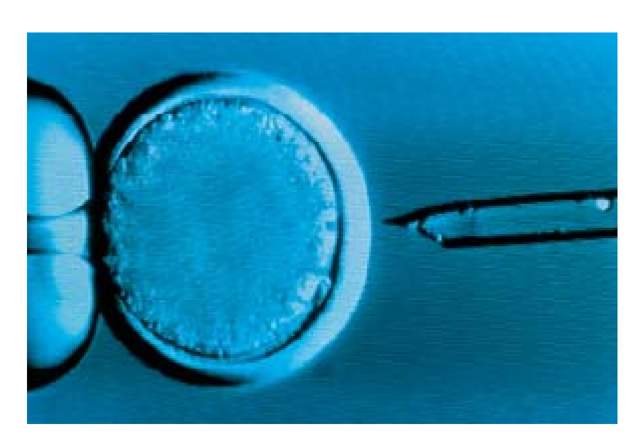
Conocido el gen, entrando en los ochenta, se decide abordar el genoma entero. El de *Drosophila* no había perdido atractivo. En 1980 C. Nusslein-Volhard y E. Wieschaus aplicaron un análisis mutacional sistemático para identificar los genes implicados en el proceso embrionario. Su trabajo condujo al descubrimiento de los componentes de la mayoría de las principales vías de señalización. También en 1980 David Bolstein planteó la posibilidad de construir un mapa genético completo de los cromosomas humanos mediante el seguimiento de la herencia de polimorfismos de ADN, vale decir, de las variaciones de las secuencias de ADN.

La revolución genómica cobró un impulso decisivo en 1983: Kary Mullis concibe la reacción en cadena de la polimerasa, un proceso químico de replicación del ADN. Un año después, Alec Jeffreys desarrolla la técnica de las "huellas digitales genéticas", una suerte de identificación personal a través del análisis de las secuencias polimórficas de los individuos. De 1984 es la observación del fenómeno de la impronta. De acuerdo con el mismo, ciertos genes poseen sólo un alelo funcional en algunos tejidos; la otra copia del gen, aun-

que presente, se mantiene en una condición inactiva. Se atribuyen a la ausencia de una impronta correcta, y a las mutaciones en la única copia de los genes con impronta, ciertas malformaciones congénitas y cáncer.

El objetivo último residía, empero, en la secuenciación del genoma humano. Con las técnicas disponibles en 1985, cuando la cuestión se puso sobre el tapete, sólo podían leerse unas 300 bases en cada análisis; puesto que el genoma humano comprendía unos 3000 millones de pares de bases de ADN, se requerirían decenios de trabajo y ejércitos de investigadores dedicados en exclusiva a ello. Parecía, pues, inalcanzable. Algunos cuestionaban incluso su viabilidad, habida cuenta de que un 95 % del genoma correspondía a "ADN basura", no codificador. Con todo, en 1986 se anuncia la "Iniciativa del Genoma Humano", convertida más tarde (1990) en "Proyecto Genoma Humano". En 1987 se sube un primer grado con el levantamiento de un mapa comprehensivo con 400 postes señalizadores; transcurrido un decenio tales hitos se elevarán a 10.000. Justamente a medio camino, en 1992, se había obtenido un mapa esquemático del polimorfismo genético en humanos.

La secuenciación de un genoma completo llega pronto. En 1995, el equipo encabezado por J. Craig Venter, Hamilton Smith y Claire Fraser despliegan la primera secuencia del ADN de un microorganismo en vida libre. Corresponde a la bacteria *Haemophilus influenzae*, cuyo genoma consta de 1,8 millones de bases. Le sigue, un año después, la primera secuencia del genoma de un eucariota, el de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, dotado de 12 millones de bases. En 1998 se obtiene el primer genoma de un organismo pluricelular, el del nemátodo *Caenorhabditis elegans*, de 97 millones de bases. Anunciado para 2005, se adelanta en cinco años el primer borrador del genoma humano. También en el año 2000 concluía el desciframiento del genoma de *Drosophila melanogaster*. La identificación del genoma entero ha requerido la intervención de máquinas secuenciadoras automáticas capaces de revelar hasta medio millón de bases por día.



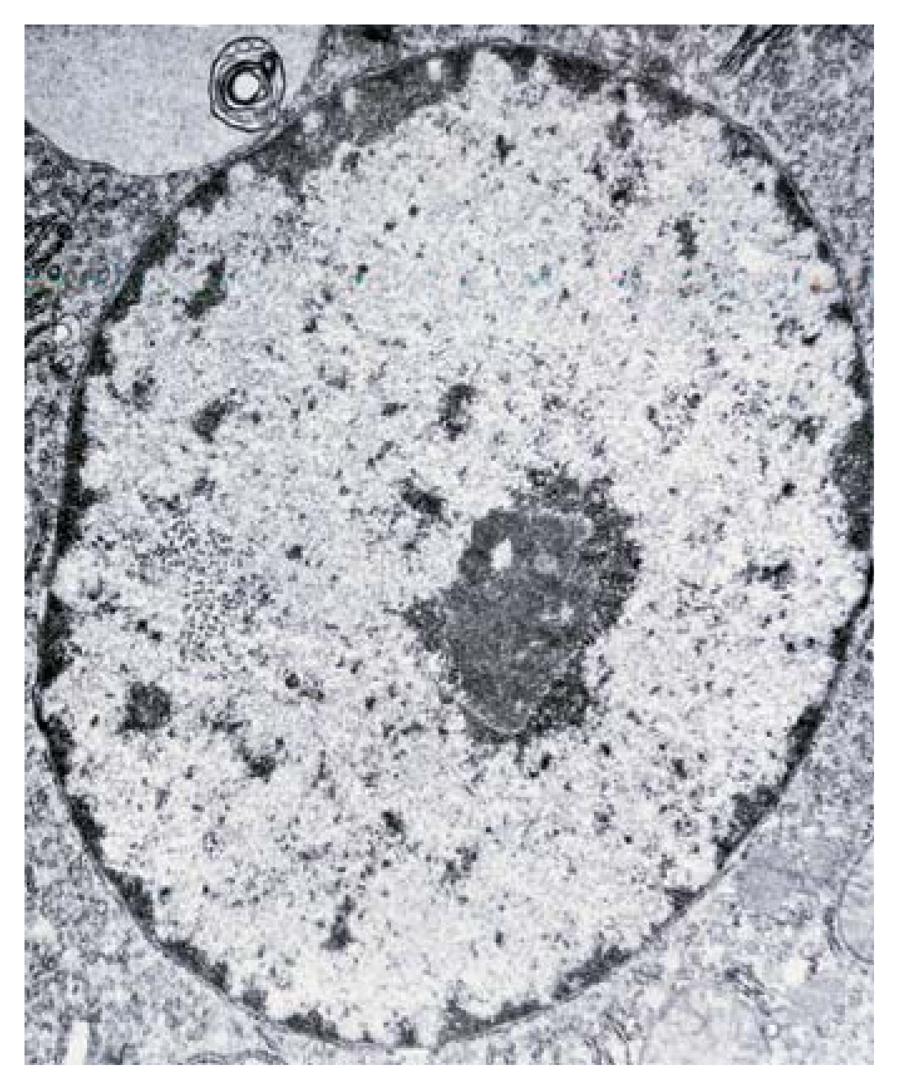
3. OVULO DE OVEJA dispuesto para ser clonado.

No podemos separar los logros cosechados en el genoma del avance paralelo en los procesos de transferencia nuclear, un campo de larga historia. En 1942 se obtuvieron ya, en ratas, embriones a partir de un blastómero aislado en el estadio de dos células, y hasta el estadio de ocho células en conejos en 1968. Derek Bromhall consiguió en 1975 blastocistos mediante introducción microquirúrgica de núcleos de embriones precoces en óvulos enucleados de conejo. El primer individuo a término, derivado de un proceso de transferencia nuclear en mamíferos, llegó en 1981, cuando Karl Illmensee y Peter Hoppe, trabajando con ratones, introdujeron núcleos en óvulos fecundados enucleados. Pero esos resultados no pudieron repetirse. Más cautos, otros sostienen que han generado líneas de células madre embrionarias pluripotentes a partir de blastocistos de ratón. Por fin, en 1983, James McGrath y Davor Solter obtuvieron un individuo mediante transferencia de núcleos entre óvulos de ratón sin fecundar en el estadio de una célula, utilizando la fusión inducida por virus; sin embargo, los núcleos tomados en una fase ulterior, aun cuando fuera de dos células, no pudieron proseguir en el desarrollo.

¿Por qué no intentar la clonación? Pese a ensayarla en ratones, un año después, McGrath y Solter admiten su fracaso y proclaman que la clonación de mamíferos por transferencia nuclear simple es imposible. (En 1984, se logró la transferencia horizontal de genes entre distintas especies, primero de *Agrobacterium* a plantas.) Pero los experimentos de transferencia nuclear se mostraron más exitosos en el ganado que lo habían sido en ratones. Por transferencia nuclear S. M. Willadsen clona en 1986 una oveja a partir de células embrionarias. Y lo que constituía una aceptada barrera teórica, la clonación a partir de células adultas, saltó en 1997 con la creación de Dolly. Dos años antes, Ian Wilmut y Keith Campbell habían logrado ya una oveja utilizando células diferenciadas de embriones. Puesto que el núcleo que dio origen a Dolly procedía de un animal adulto y puesto que tal hazaña de replicación se había logrado en mamíferos, la idea de una clonación posible de humanos cobró visos de realidad. Más segura avanza la investigación en células madre. En 1998, John Gearhart deriva líneas celulares germinales embrionarias a partir de fetos abortados. Hasta ahí se ha llegado merced al singular desarrollo de la citología en los últimos veinticinco años, que empezó con un artículo publicado el mismo año en que se descifró la clave genética.

Ciclo celular

En 1953 se pusieron, en efecto, las bases del ciclo celular. Alma Howard y Stephen Pelc se fijaron en la concentración cambiante de ADN en la célula y, por métodos autorradiográficos, revelaron que sólo se producía síntesis de ADN en un intervalo temporal acotado (a mitad de la interfase) del comienzo del proceso de división celular. Descubrimiento que nos llevaría en última instancia a descomponer el ciclo celular en una secuencia de fases: S, G1, M y G2. De esas cuatro etapas las dos principales son la fase S, cuando se replican



4. HEPATOCITO DE RATON, aumentado 22.000 veces en esta célebre microfotografía electrónica tomada por David E. Comings y Tadashi Okada. Se aprecia el núcleo, rodeado por su doble membrana, repleto de cromatina.

los cromosomas, y la fase M o mitosis, cuando los cromosomas replicados se segregan en dos células hijas. A la fase S precede una fase de intervalo (“gap”), la G1; entre la fase S y la mitosis transcurre la fase G2. Para regular el momento del inicio de cada fase y evitar fallos en la transición de una fase a otra, la célula dispone de mecanismos de control, unas señales químicas que fluyen libres entre el núcleo y el citoplasma, atisbadas en 1970 por P. Rao y R. Johnson. En particular, la entrada en mitosis, resolvieron un año más tarde Yoshio Masui y Clement Markert, venía determinada por el factor promotor de la maduración (FPM). Hasta 1988 no lograron purificarlo Manfred Lohka, Marianne Hayes y James Maller.

Para mantener la integridad del ciclo de división, las células deben superar, indemnes, numerosas agresiones. Acabamos de decir que no se entra en una fase del proceso si los pasos precedentes no se han desarrollado de manera satisfactoria. Las células suspenden el avance en los puntos de control (“checkpoints”), descritos por Leland Hartwell y Ted Weinert en 1989. La célula se detiene en la fase G2 y da tiempo para la reparación del ADN dañado. Se han descubierto varias proteínas que intervienen en esa función de control, así como su interacción con la cromatina para trasladar la señal de paro. En 1991 Andrew Hoy y Andrew Murray identificaron los puntos de control del huso mitótico, al mostrar la existencia de un mecanismo retroalimentador que evitaba el abandono de la mitosis si el huso no estaba completamente constituido. Con el posterior hallazgo de los genes supresores de tumores, determinantes de proteínas controladoras, la cuestión ha crecido en interés.

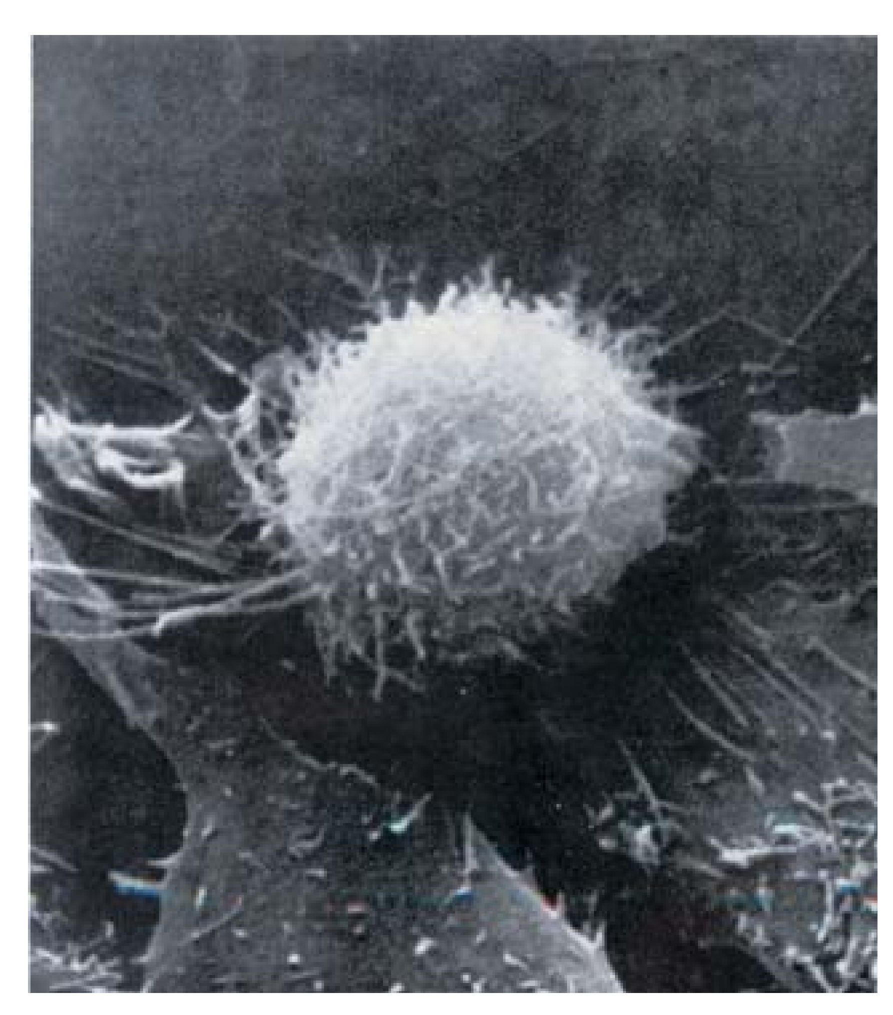
La genética del ciclo celular, los genes *cdc*, la abordaron en 1970 L. H. Hartwell, J. Culotti y B. Reid. Tomaron por sistema modelo la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, cuyos mutantes permitieron identificar los tres primeros genes *cdc*. Llamaron punto de ejecución al estadio del ciclo en que se exigía la intervención génica. En el breve intervalo de tres años se distinguían ya dos vías paralelas en el ciclo celular. Ambas requerían la terminación de la etapa “arranque”, cifrada por el mutante *cdc28*. Otra levadura, *Schizosaccharomyces pombe*, se reputaba también ideal para estudiar la división celular, pues origina dos descendientes del mismo tamaño.

En 1975 comenzó una investigación que concluiría, diez años más tarde, con la identificación de los componentes implicados: una quinasa inhibidora y una fosfatasa activadora. El trabajo lo inició Paul Nurse con el aislamiento de mutantes en los que se perdían los controles reguladores de la división. Tras su primera identificación del mutante *wee1-50*, siguieron varios más, entre ellos el *cdc25*. Así las cosas, el equipo liderado por Tim Hunt revela en 1982 la acumulación insólita de ciertas proteínas, a las que llamaron ciclinas, en la interfase. Cuatro años más tarde, Nurse y Paul Russell clonaron el gen *cdc25*, inductor de la mitosis. Según quedaría luego puesto de relieve, la regulación de la división mitótica depende de dos fuerzas antagónicas que controlan la actividad de la quinasa cdc2 dependiente de ciclina, familia de enzimas codificada por *cdc28*.

Se dio otro punto de inflexión en 1991 con el descubrimiento, por Michael Glotzer, Andrew Murray y Marc Kirschner, del papel decisivo de la proteolisis en la regulación de la concentración de una clase de ciclinas, las B. Intervenía en ello

un complejo promotor de la anafase o ciclosoma (CPA/C). Dos años después se lograba el primero de los principales reguladores del ciclo celular: los inhibidores de las quinasas dependientes de ciclina.

Un aspecto complementario del ciclo celular era la compactación con que se encontraba el ADN. En metafase, el cromosoma eucariota viene a ser unas 10.000 veces más estrecho que el ADN que contiene. Tamaña compactación se adquiere a través de varios pasos, empezando por la revolución de la doble hélice de ADN en torno a un octámero de histona para formar así un nucleosoma. El primer modelo de nucleosoma lo elaboró, en 1974, R. D. Kornberg: unos 200 pares de bases de ADN se asociaban con ocho moléculas de histonas en una estructura iterativa. Seis años más tarde A. Klug cristalizó el núcleo de histonas del nucleosoma y, por difracción de rayos X, reveló la disposición de una histona a baja resolución; hasta 1997 K. Luger no dio a conocer la estructura cristalina del núcleo del nucleosoma a una resolución de 2,8 angstrom.



5. CAMBIO DE CONFIGURACION de la superficie de la célula, de plana a redonda (*arriba*), conforme entra en la fase final de su ciclo de división. La superficie celular aparece recubierta por finas y largas proyecciones que le permitirán asirse al substrato. La micrografía fue realizada por Keith R. Porter, David M. Prescott y Jearl F. Frye.

Envejecimiento celular y apoptosis

Las células normales tienen una capacidad limitada de dividirse. Llega un momento en que dejan de crecer (senescentes). El fenómeno de la senescencia celular lo descubrió, hace unos 40 años, Leonard Hayflick, en cuyo honor recibe el nombre de "límite de Hayflick". Los experimentos citogenéticos realizados en *Drosophila* por Hermann Muller (1938) y en maíz por Barbara McClinctock (1941) habían revelado que los extremos de cromosomas rotos podían fusionarse entre sí, mientras que los extremos normales, a los que llamaron telómeros, carecían de esa facultad. Alexy Olovnikov, abordando directamente la cuestión, reconocía en 1973 que el secreto de la misma podría esconderse en el recorte del telómero en cada tanda de replicación; el acortamiento del telómero podría constituir la base del límite de Hayflick.

Se intuyó más tarde que los telómeros no podían replicarse por las polimerasas conocidas, ninguna de las cuales comenzaba su actividad en el extremo real de una molécula de ADN. En el camino hacia la solución dio un primer paso Elizabeth Blackburn en 1978 al establecer la secuencia de los extremos de los cromosomas, a partir de los genes extracromosómicos que codifican el ARN ribosómico del ciliado *Tetrahymena thermophila*. Blackburn observó que los telómeros constaban de pares de bases de la secuencia repetitiva TTGGGG. Más tarde, Carol Greider descubrió la actividad enzimática que sintetizaba las repeticiones teloméricas, la telomerasa. Se demostró luego que la mayoría de los organismos eucariotas abundaban también en repeticiones TG/AG en sus telómeros. Blackburn y Greider, en 1989, revelaron que el componente ARN de 159 nucleótidos de la telomerasa contenía la secuencia CAACCCCAA, el molde real de la síntesis de repeticiones TTGGGG.

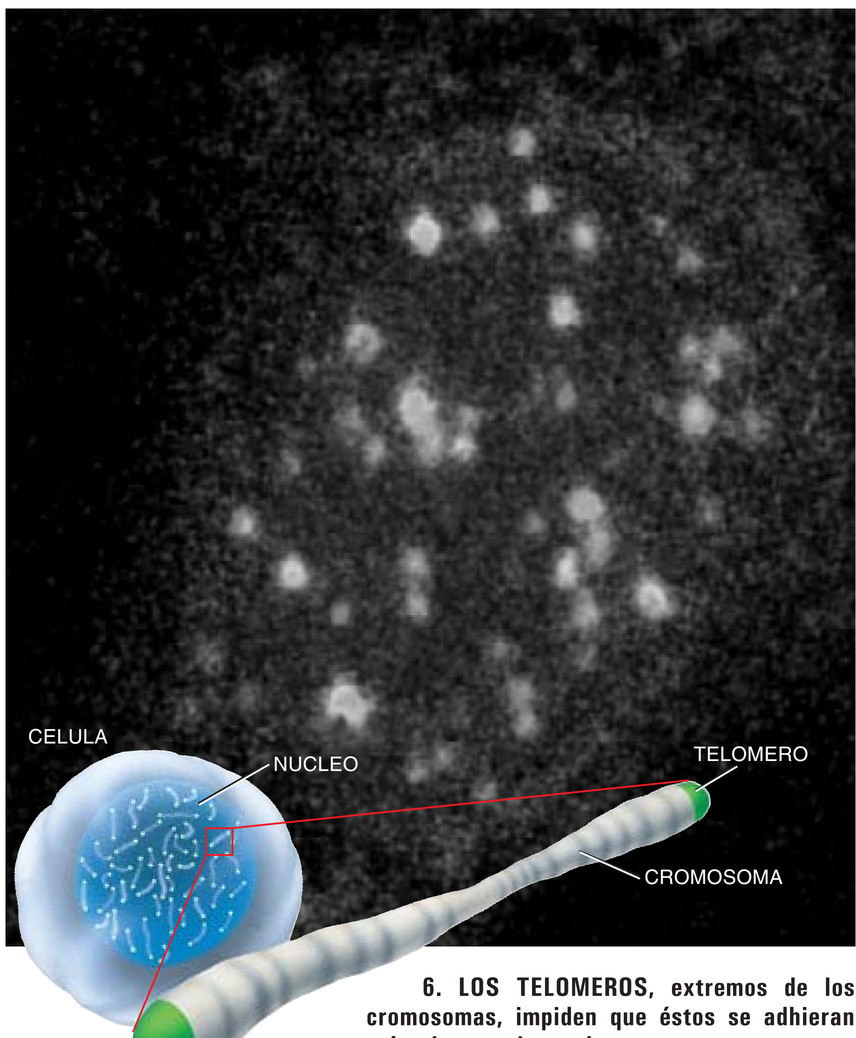
En determinadas situaciones, las células recurren a su autodestrucción. Aunque Bob Horvitz llamó la atención sobre la apoptosis en 1986, al estudiar el desarrollo de los nemátodos, el mecanismo molecular subyacente no empezó a desentrañarse hasta 1993 cuando el propio Horvitz descubrió que el *ced-3*, uno de los genes esenciales de la vía apoptópica del gusano *C. elegans*, determinaba una caspasa. Dos años después, Xiadong Wang iniciaba un trabajo de investigación que llevaría, en 1996, a atribuir un papel central al citocromo c. En el

año 2000 se confirmó que las caspasas desencadenaban una cascada proteolítica durante la apoptosis. Para entonces se sabía ya que la apoptosis era esencial para el desarrollo del animal y la homeostasis de los tejidos.

Citoesqueleto

Del mantenimiento de la forma de la célula se encarga el citoesqueleto. La microscopía electrónica nos ha corroborado la estrecha semejanza estructural entre microtúbulos, cilios y cuerpos basales. Los cilios constan de nueve dobletes de microtúbulos que rodean un par central de túbulos, mientras que los centriolos y cuerpos basales constan de nueve tripletes de cortos microtúbulos sin túbulos centrales.

La investigación en ese campo ha cosechado más de un éxito reseñable. De 1970 data la identificación de las condiciones para la polimerización de la tubulina (subunidad proteica de los microtúbulos) *in vitro*. Diez años después, quedó probada la polaridad de los microtúbulos, *in vitro* e *in vivo*. En 1985 se descubrió la quinesina, enzima motora dependiente del microtúbulo, cuya clonación posterior mostró un sorprendente parecido entre esa enzima motora y varias proteínas de interés en la mitosis. En 1990 se demostró que la gammatubulina, recién hallada, requerida para la correcta división nuclear, era un componente de los cuerpos basales del huso.



6. LOS TELOMEROS, extremos de los cromosomas, impiden que éstos se adhieran entre sí e interaccionen hasta amenazar su estabilidad. En la micrografía de arriba se observan, resaltados con colores brillantes, los telómeros de una célula de epidermis humana. La imagen, tomada mediante microscopía de barrido con láser, es una composición de diversas secciones ópticas del núcleo. Cada color indica una profundidad distinta.

Membrana celular

La célula puede acometer el ciclo de división y realizar los procesos que le son propios porque está protegida del exterior por una membrana. En los años sesenta, Marilyn G. Farquhar y George F. Palade revelaban que ciertos motivos de la superficie resultaban comunes a distintos tipos celulares; describieron, además, una constelación de estructuras que se presentaban juntas en la interfaz entre células adyacentes. En 1966 se sugirió que las moléculas de la matriz extracelular (MEC), formadas por tejido inductor, podían ser o contener señales importantes.

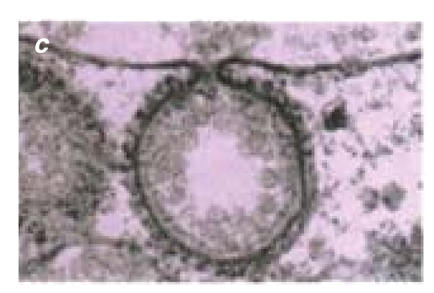
Transcurrió otro decenio hasta que los métodos bioquímicos identificaran las subunidades proteicas de esas especializaciones de la membrana y los genes que las codifican. [El proceso no se cerró; en 1993 se identificó la occludina, una proteína de las uniones estrechas.] Pero, ¿debía la superficie celular entrar en contacto con polímeros de la matriz extracelular o bastaba la difusión de una molécula señalizadora? Mediante la combinación de métodos de cultivo con microscopía y morfometría electrónicas se observó que la síntesis del colágeno se estimulaba por contacto directo con material fibroso extracelular. Este resultado anticipaba el descubrimiento, mediados los ochenta, de proteínas de la membrana plasmática que se enlazaban con fibras de la MEC.

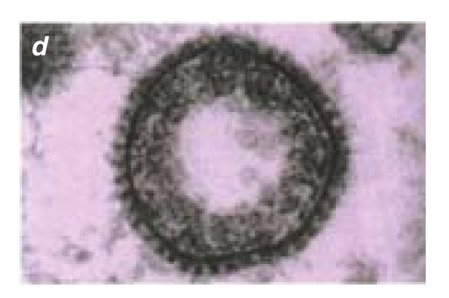
En 1989 se hizo patente que la interacción entre ligandos extracelulares e "integrinas", proteínas de membrana, inducían la expresión de genes determinantes de enzimas que degradan la matriz extracelular. La investigación ulterior nos ha llevado a la existencia de una red de procesamiento de la información que asegura la estructura y ayuda a definir pautas de desarrollo y diferenciación celular.

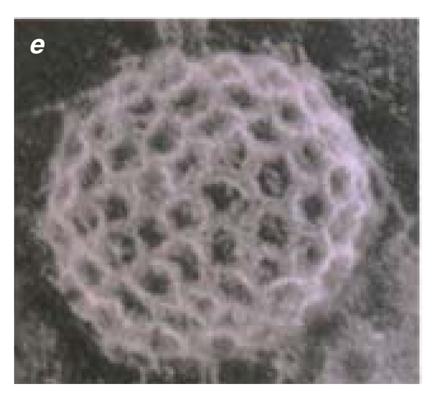
7. ETAPAS DE LA FORMACION de una vesícula por endocitosis de la membrana celular. La depresión inicial de la membrana (*a*) contiene numerosas partículas de lipoproteínas capturadas en el medio extracelular; se halla recubierta de clatrina. Tras hendirse (*b*), se cierra la abertura (*c*). La vesícula termina por desprenderse y caer al citoplasma (*d*). La imagen tomada por Lelia Orci de la vesícula (*e*) pone de manifiesto la organización de la envoltura de clatrina. (Las cuatro primeras ilustraciones son cortesía de M. M. Perry y A. B. Gilbert.)











Tráfico citoplasmático y nuclear

El interior celular está estructurado en compartimentos, vinculados por vías metabólicas que fluyen de uno a otro aprovechando la red de vesículas. El núcleo, citosol, mitocondrias, retículo endoplasmático, aparato de Golgi, membrana plasmática y lisosomas son orgánulos donde acontecen la síntesis de ADN, glicolisis, síntesis de ATP, biosíntesis de membrana, glicosilación de proteínas, transporte de solutos y degradación de macromoléculas, respectivamente. A finales de los años setenta se conocían, a grandes rasgos, los mecanismos moleculares implicados. Por los trabajos de Palade se sabía de la realidad de un transporte de proteínas entre compartimentos unidos por sus membranas. Se había incluso demostrado que las proteínas segregadas seguían una ruta de transporte desde el retículo endoplasmático hasta el aparato de Golgi para continuar hasta la superficie celular.

Michael Brown y Joseph Goldstein aportaron la primera demostración clara de que el transporte selectivo entre compartimentos estaba mediado por vesículas. [Investigando la envoltura de las vesículas endocíticas se supo que la clatrina constituía la subunidad proteica principal de dicho revestimiento.] La fusión de membranas resultaba ser el mecanismo empleado por las células para la liberación controlada de hormonas endocrinas, enzimas digestivas y un arsenal de mediadores, como la histamina, la adrenalina y numerosas citoquinas y factores de desarrollo.

James E. Rothman descubrió en 1993 la especificidad de la fusión de membranas en el complejo receptor de las proteínas de adhesión. La investigación se ha venido centrando desde entonces en los mecanismos en cuya virtud el complejo receptor está regulado por proteínas adicionales para permitir una fusión de membranas sometida a un control local y temporal.

Pero en la maquinaria celular no importaba sólo la síntesis y transporte de metabolitos, sino también su degradación. La primera prueba sólida —tras los trabajos iniciales de Avram Hershko— sobre la implicación del sistema de ubiquitina en la degradación de las proteínas celulares la ofrecieron Alexander Varshavsky, Daniel Finley y Aaron Ciechanover en 1984. La ubiquitinación señala las proteínas que deben degradarse por la proteasoma 26*S* y regula la internalización de proteínas de la membrana plasmática. A lo largo del postrer decenio se ha ido otorgando un papel creciente a la proteolisis en la regulación, diferenciación y desarrollo del ciclo celular, la respuesta celular al estrés, modulación de los receptores de superficie celulares y canales iónicos, reparación, regulación del sistema inmunitario y respuestas inflamatorias, biogénesis de orgánulos, y control de calidad en el citosol y en las vías secretoras.

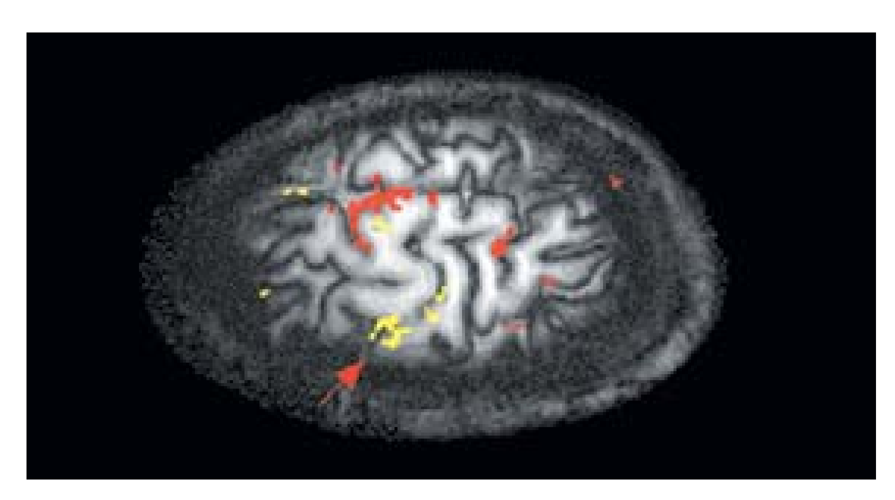
Desde hace más de medio siglo se conoce el carácter discontinuo de la doble cubierta nuclear. Un sinfín de poros de 60-70 nanómetros la atraviesan. Asociado con cada poro hallamos un conjunto de estructuras de simetría octogonal, el “complejo pórico nuclear” (CPN). Cuanto sabemos sobre el CPN se lo debemos en buena medida al análisis por microscopía electrónica de fragmentos de la cubierta nuclear. El refinamiento en la técnica microscópica ha repercutido en la resolución creciente y conocimiento de la composición química del CPN. En 1982 P. N. T. Unwin y R. A. Milligan aplicaron el análisis de formación de imágenes al CPN.

Junto a ello, a principios de los ochenta se entrevió que la importación de proteínas nucleares demandaba una vía molecular específica. Sobre todo, tras el hallazgo de las secuencias de localización nuclear (SLN). La mayoría de las SLN contienen segmentos cortos

de aminoácidos que, cuando se transfieren a una proteína citoplasmática, provocan su alojamiento erróneo en el núcleo. Pero el modo de proceder de las SLN siguió envuelto en el misterio hasta que se descubrieron las proteínas receptoras que se anclaban a las SLN y portaban la proteína nuclear hasta el complejo pórico nuclear.

El flujo de macromoléculas entre el núcleo y el citoplasma, en ambas direcciones, resulta imprescindible para la mayoría de los procesos básicos del metabolismo celular. Salvo un brevísimo lapso de tiempo de la mitosis, ese flujo debe proceder a través de la envoltura nuclear y, específicamente, a través del complejo pórico nuclear.

El primero de los receptores proteicos implicados en aislarse fue la importina, logrado por D. Görlich en 1994. De entonces acá se han identificado otros receptores que han permitido entender mucho mejor las vías complejas seguidas por las proteínas nucleares en su transporte hasta la envoltura nuclear y luego translocadas a través del complejo pórico nuclear hasta el núcleo. M. P. Rout y otros demostraron en el año 2000 que el número total de proteínas del complejo no pasan de 30 y que en su mayoría se encuentran en ambos lados, citoplasmático y nuclear, del CPN.



8. GRACIAS A LA TECNICA de resonancia magnética nos es dado observar ciertas respuestas de las regiones cerebrales. En este caso, las regiones que se activan cuando un sujeto mueve los dedos (*amarillo*) o los pies (*rojo*).

Neuronas

Para explicar la comunicación entre células, ninguna más adecuada que la neurona. Todavía en los años cincuenta se suponía que las neuronas cerebrales se comunicaban entre sí sólo mediante impulsos eléctricos. Mediado ese decenio, Vernon Mountcastle, David Hubel y Torsten Wisel inician los trabajos de registros unicelulares de la corteza sensorial de los mamíferos. Pero Niels-Ake Hillarp introduce ya los métodos de microscopía de fluorescencia para estudiar la distribución celular de aminas biogénicas. Coinciden en esos años varios episodios de largo alcance en el campo de la neurología. Así, Rita Levi-Montalcini y Stanley Cohen aíslan y purifican el factor de crecimiento nervioso, Brenda Milner resalta la intervención del lóbulo temporal medial en la memoria y Arvid Carlsson descubre que la dopamina constituye un transmisor cerebral. Comienza de ese modo a abrirse paso la teoría de la transmisión química, reservada hasta entonces al sistema nervioso periférico.

Katz y otros, en el decenio de los sesenta, abordan las terminales presinápticas. Observan que los transmisores químicos, la acetilcolina en particular, se liberan en paquetes discretos de unas 5000 moléculas. Cada paquete (o “cuanto”) se almacenaba en una vesícula, que por exocitosis liberaba su contenido en el sitio indicado. La señal clave que promovía esa secuencia era la aportación de iones calcio. A finales de la década, se disponía de bastante información sobre la biofísica y bioquímica de los poros iónicos, su selectividad y su actividad; la selectividad dependía de la interacción entre el canal y el ion; la actividad, o mecanismo de apertura y cierre, resultaba de cambios conformacionales. Esa investigación se corona con la hipótesis de la quimioafinidad, propuesta por Roger Sperry, según la cual existe un sistema preciso de ajuste químico entre los componentes presinápticos y postsinápticos. *Aplisia*, *Drosophila* y *Caenorhabditis elegans* son los organismos habituales donde se examinan procesos elementales de memoria y aprendizaje. En ratones se obtiene la primera prueba de la relación entre síntesis de proteínas y formación de memoria; en tanto que Ed Evarts y Robert Wurtz realizan registros de neuronas en monos despiertos para estudiar el movimiento y la percepción.

Muy pronto se pasa de la consideración de la neurona aislada a varias relacionadas. Cuando se cartografiaron las primeras conexiones, se advirtió que en algunos casos la excitación de una neurona precedía al silenciamiento de otra: la primera, tal parecía, enviaba señales que inhibían la actividad de la segunda. En 1973 Timothy Bliss y Terje Lomo descubren la potenciación a largo plazo, un mecanismo sináptico que podía explicar la memoria a largo plazo, es decir, la que persiste más de un día. Un año después, Sydney Brenner se plantea la génesis del sistema nervioso. Toma por modelo experimental a *C. elegans*, un sistema de escasos centenares de neuronas, ideal, por tanto, para maniobrar en la búsqueda de explicación de numerosos aspectos del comportamiento. Mediados los setenta, Paul Greengard demuestra que muchos neurotransmisores operan a través de la fosforilación de proteínas.

Reseñable fue, asimismo, el desarrollo del método del pinzamiento de membrana en 1976, creado por Erwin Naher y Bert Sakman. Posibilitaba la medición directa de la corriente que fluía por un canal iónico. El desarrollo del pinzamiento de membrana coincidió con

el advenimiento de la clonación molecular. Merced a ambos aparecieron las primeras secuencias de aminoácidos de los canales. Tales secuencias encerraban la clave de la disposición de las proteínas de los receptores y de las proteínas de los canales.

Pinzamiento, clonación, formación de imágenes. A caballo entre los setenta y los ochenta la neurología recibe un impulso efectista con las técnicas de formación de imágenes por tomografía de emisión de positrones (TEP). No se trataba ya de una neurona, ni de un par de neuronas, sino de grandes poblaciones de neuronas. El procesamiento sensorial, la percepción y la memoria aparecen *in vivo* con los nuevos medios. La técnica TEP se funda en la medición del flujo regional de la sangre. Otra técnica complementaria, llegada en 1990, la resonancia magnética funcional (RMF), se apoya en los cambios de niveles de oxígeno operados durante la actividad nerviosa; la hemoglobina oxigenada y la desoxigenada presentan distintas propiedades magnéticas.

La investigación bioquímica acompasaba el dominio técnico. A comienzos de los ochenta se identificaron los receptores metabotrópicos, una segunda clase que se sumaba a los canales ionotrópicos, donde el ligando se une al canal iónico. En los metabotrópicos la unión del ligando desencadena los procesos metabólicos intracelulares. La clonación de los receptores metabotrópicos puso de manifiesto su estrecho parecido con la rodopsina bacteriana y con el pigmento fotorreceptor de los organismos pluricelulares.

De la aplicación de los métodos genéticos moleculares, incluida la transgénesis o *knockout*, un decenio más tarde, se beneficiaría el sistema sensorial. En efecto, en 1991 Linda Buck y Richard Axel cifran en mil los genes de los receptores de los olores. Estos pertenecen a una extensa familia de receptores acoplados a la proteína G, que amplifican señales a través de cascadas semióticas intracelulares, un mecanismo compartido por el sentido del gusto y el de la vista. La universalidad sensorial de tales receptores hizo advertir de su conservación en el curso de la evolución. Aunque algunas proteínas G activan los canales iónicos directamente, la mayoría estimulan enzimas de membrana que alteran la concentración de AMPc y GMPc, entre otros segundos mensajeros, iniciadores, a su vez, de procesos que conducen a la permeabilidad del canal, la sensibilidad del receptor y la liberación del transmisor. Muchas de estas acciones sinápticas, sabemos hoy, están mediadas por fosforilación o desfosforilación de proteínas.

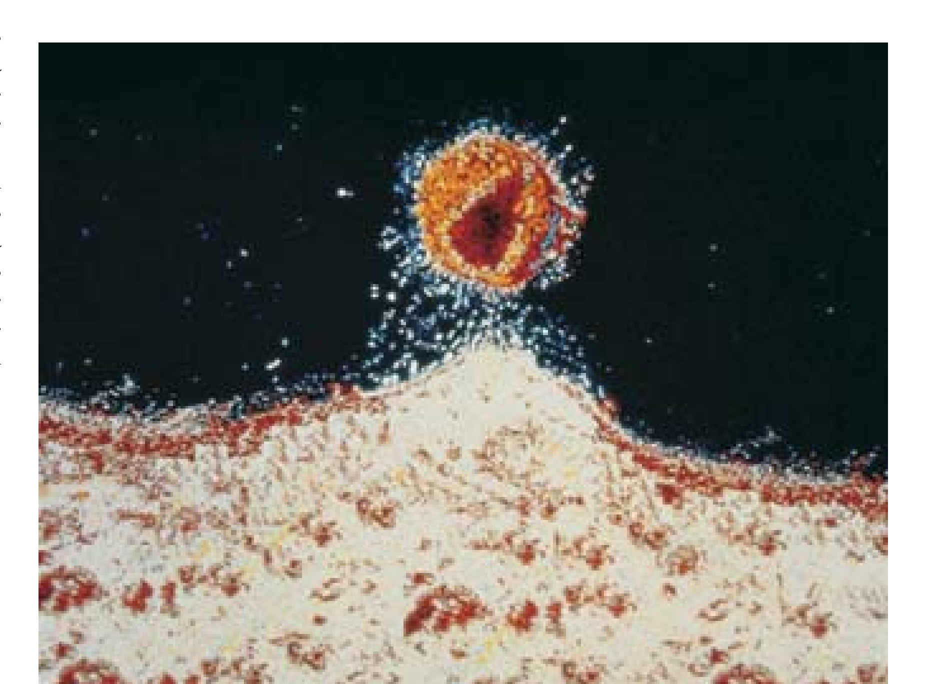
También se ha ido aclarando en los últimos años la excitación síncrona de neuronas implicadas en una misma tarea. Pero seguimos desconociendo el aspecto fundamental del funcionamiento del sistema nervioso: cómo se forman las sinapsis. Desde hace poco contamos con una nueva vía prometedora, a saber, que las células de la glía intervienen en numerosas sinapsis. El campo, pues, se ensancha.

Células de defensa

Para explicar la estabilidad celular, nada mejor que conocer su defensa ante las agresiones. Los años cincuenta desarrollaron un potente armamentario contra las enfermedades bacterianas, con la difusión de la penicilina, estreptomicina, cloranfenicol y otros. Aunque más esquivos, la vacuna contra la poliomielitis de Jonas Salk y Albert Sabin prometía domeñar los virus patógenos.

En los años setenta, enunciada algunos lustros antes la teoría de la selección clonal por Frank Burnet para explicar la respuesta inmunitaria, se sabía que los linfocitos T y B proliferaban y se diferenciaban en células efectoras o diana ante el estímulo del antígeno. Los linfocitos T se generan a partir de células madre del timo, mientras que los linfocitos B lo hacen a partir de células madre de la médula ósea. Cada linfocito B expresa anticuerpos, dotados de singular especificidad hacia el antígeno. En esos años no se conocía todavía el receptor del antígeno en la célula T, aunque se consideraba asentado que las células T podían dividirse, tras el encuentro con el antígeno, en linfocitos T citotóxicos, capacitados para lisar otras células, o en linfocitos T coadyuvantes, estimuladores de la facultad secretora de anticuerpos de las células B. Se admitía, asimismo, que la activación de la célula T requería el concurso de los macrófagos o de las células B.

No tardó en hallarse que la interacción específica entre células T y células presentadoras de antígenos dependía de lo que daría en llamarse complejo principal de histocompatibilidad (MHC). Los experimentos con quimeras en 1975 establecieron que las células T podían expresar receptores que reconocían antígenos diversos y moléculas del MHC. Al poco se resolvía la base de la especificidad de los anticuerpos: los elementos génicos



9. ERUPCION del virus del sida de una célula apto para emigrar e infectar a otras.

de la región constante y variable se yuxtaponían para crear anticuerpos diversos.

Pese a tales avances, un suceso inesperado dejó ver en 1981 la precariedad de la inmunología. El Centro de Control y Prevención de las Enfermedades de Atlanta alertaba de una nueva pandemia, el sida. Su incesante difusión desde entonces ha coincidido con la emergencia de microorganismos resistentes a los fármacos, un episodio más de la adaptación ante una presión selectiva. Luc Montagnier y Robert Gallo anuncian en 1983 que el agente causante del sida, el virus de la inmunodeficiencia humana, pertenece a la familia de los retrovirus. Con todo, el acierto de Montagnier, sobre todo, vino facilitado por otra línea de investigación en marcha: la de los oncogenes.

Oncogenes

Cuando pierden su control interno, las células se multiplican sin cesar e invaden tejidos. En los años sesenta se atribuía el cáncer a un doble origen, externo (vírico o químico) e interno o hereditario. Los estudios sobre el virus del sarcoma de Rous, en particular, habían aportado bastante información. El análisis del virus en 1970 demostró que su genoma estaba constituido por una molécula de ARN que se copiaba en ADN cuando infectaba la célula; luego, este ADN se transcribía en ARN, parte del cual se empaquetaba en nuevas partículas víricas y parte servía de ARNm para los cuatro genes víricos: *gag*, *pol*, *env* y *src*. Mediados los setenta, se descubre que el gen *src* cifra una proteína responsable de la transformación neoplásica, un oncogén; H. E. Varmus y J. M. Bishop y P. K. Vogt asocian oncogenes víricos a la tumoración celular.

Poco después, se informa que los genes *src* víricos y celulares (*src*-v y *src*-c) determinan una quinasa de tirosina, enzima alojada en la superficie interna de la membrana plasmática. Y se infiere la existencia de genes supresores de tumores, o anti-oncogenes; se identificó primero el *p53*, que codifica una proteína reguladora del ciclo celular, la reparación del ADN y la estabilidad del genoma, entre otras funciones. Con el tiempo, se van agregando otros genes que participan en la patogénesis del cáncer.

Por su lado, la secuenciación del ADN reveló nexos inesperados entre genes; así, entre los oncogenes *sis* y *erb*. A propósito de éstos, cuando el análisis bioquímico reveló que el ADN se correspondía con la secuencia aminoacídica de ciertos factores del crecimiento, se hizo la luz sobre el modo en que ambos oncogenes transformaban células normales en células tumorales. Se cubría toda la trayectoria genética del cáncer: en virtud de una mutación operada en un gen determinante del desarrollo se activaba un protooncogén, un gen supresor de tumores o un gen reparador de la molécula de ADN.

De la célula al organismo

Biólogos del desarrollo, los modernos embriólogos, han venido investigando desde hace tiempo las etapas que recorre la célula fecundada hasta convertirse en organismo. A lo largo del siglo XX se avanzó mucho en el conocimiento de la interacción entre diferentes células y entre diferentes tejidos a través del desarrollo. Pero la disciplina se transformó en el postrer tercio gracias al análisis de los genes del desarrollo, que se activan en diferentes partes del embrión y en sucesión temporal.

Tras el descubrimiento del complejo *bithorax* en 1978 por Edward Lewis, y sobre todo, merced al trabajo de Nüsslein-Volhard y Wieschauss, dos años después, sobre mutantes maternos y cigóticos en *Drosophila*, la biología del desarrollo recibe un particular impulso que alcanzará su punto álgido en 1984, cuando se introdujeron las secuencias *homeobox*. Lewis identificó un complejo de genes que daba cuenta de la diversificación antero-posterior de la mosca. A través del examen de mutantes de efecto materno (los genes de la madre depositan ARN y proteínas en el óvulo) y de efecto cigótico (los genes determinantes son los del cigoto), que condicionaban los estadios embrionarios iniciales, se llegó al conocimiento de los genes responsables del eje antero-posterior y dorsoventral del organismo.

Con los años fueron identificándose distintos genes involucrados en diferentes fases, cuya depuración ha permitido elaborar una jerarquía de genes del desarrollo. A tenor de la misma, del gradiente ventro-dorsal se ocuparía el gen *dorsal*, en tanto que el gen *bicoid*, materno, determinaría el desarrollo de la cabeza y el *nanos*, la región posterior. Los genes *gap* se repartirían los segmentos componentes del tórax y abdomen de la mosca. Terminada la segmentación, tres grandes complejos génicos, el *antennapedia*, el *bithorax* y el *ultrabithorax*, darían cuenta del destino último de los segmentos.

Por su parte, el desarrollo vegetal requiere la regulación coordinada de la división, expansión y diferenciación celular. En la regulación de estos procesos interviene la auxina, es decir, la hormona indol-3-ácido acético. El modelo usual ha sido *Arabidopsis thaliana*. En el año 2000 se vio que se mermaba la respuesta de la auxina si se producían mutaciones recesivas en los genes *AXR1* y *TIR1*, componentes ambos de la vía proteolítica mediada por ubiquitina.

De la ecología...

De la estructura y función de las poblaciones en un medio determinado, de los ecosistemas, ha interesado sobre todo la identificación de los componentes y su respuesta a las condiciones del entorno (flujo de energía y materia), las interacciones interespecíficas y las intraespecíficas (lucha por los recursos, mutualismo, depredación o parasitismo). Desde mediados del siglo XX entró en juego la teoría de la información para dar cuenta de la variación temporal, histórica, de las comunidades o ecosistemas enteros; en cuanto sistemas históricos, portadores por tanto de información, los ecosistemas permiten una reconstrucción parcial del pasado. De ese modo cobraba una nueva perspectiva la teoría de la sucesión ecológica. Pese a la incorporación a lo largo de los últimos

decenios de recursos teóricos de la mecánica de procesos irreversibles, sin embargo, la ecología no acaba de encontrar un tramado teórico de suficiente universalidad.

Tres han sido, y continúan siendo, las cuestiones centrales objeto de debate. En primer lugar, la importancia del ruido de fondo, es decir, las influencias estocásticas de microescala y alta frecuencia, frente a condicionamientos globales, esto es, señales de frecuencia de macroescala y baja frecuencia. En segundo lugar, la razón entre impacto de los procesos intrínsecos, intraespecíficos, e interacciones extrínsecas o interpoblacionales. Por último, la dimensionalidad de las fluctuaciones poblacionales: ¿pueden nuestros modelos de pocas dimensiones, con un par de especies involucradas, dar cuenta cabal de las fluctuaciones de comunidades ricas y complejas? En los años cincuenta y sesenta, se hacía hincapié en la densidad demográfica como criterio determinante de muchos comportamientos del ecosistema. A ello siguió, en el par de decenios inmediatos, una atención privilegiada a la complejidad tomando prestadas ideas del caos determinista.

También en ese intervalo se adquirió conciencia de la necesidad de una visión más holista de los ecosistemas. La idea tomó cuerpo en nuevos experimentos de campo a largo plazo, que sacaran a la luz los diferentes niveles de organización en el transcurso del tiempo y en espacios variables, acompasados por cambios biogeoquímicos. Los experimentos no se limitaban a la recogida de datos, sino que manipulaban el ecosistema. Así, en el ensayo iniciado en 1977 por James H. Brown en el desierto de Chihuahua, extrajo ciertos grupos funcionales de especies de hormigas y roedores herbívoros de extensas parcelas (50 m por 50 m) del hábitat arbustivo del desierto y siguió con las técnicas al uso el comportamiento de varios parámetros (poblacionales, especies y tiempo atmosférico, entre otros). La remoción persistente permitía conocer las interacciones de los microorganismos, insectos, aves, mamíferos y plantas, entre sí y con el entorno abiótico.



10. EL HOMBRE INTERVIENE EN LOS ECOSISTEMAS de muchas maneras. La caza furtiva está acabando con el tejón (*Meles meles*).

En los años noventa se abrieron dos líneas de estudio principales. Una, influida por la eclosión de publicaciones sobre el cambio climático, acometía el condicionamiento a gran escala del clima; otra se consagraba a la elaboración de modelos estocásticos no lineales, que combinaban teorías deterministas no lineales con teorías estocásticas lineales. En un afán de síntesis, se busca ahora entender las fluctuaciones de poblaciones a través de la interrelación entre ruido, limitaciones ambientales y dinámica no lineal.

...a la sistemática

El avance en genética molecular ha revolucionado la sistemática. Las relaciones de parentesco y su evolución, recogidas en las secuencias génicas, se han comenzado a abrir paso en la creación de árboles filogenéticos. Desde los años sesenta quedó claro que los criterios morfológicos resultaban insuficientes e imprecisos. Se comprobó que la semejanza morfológica constituía una variable diferente del parentesco genético y que la cuantía del cambio morfológico no dependía del tiempo transcurrido en su adquisición. Podían haberse construido nuevos planes estructurales en brevísimo tiempo, a escala evolutiva, en tanto que grupos genéticamente distantes podían persistir bastante parecidos desde tiempos remotos.

Volvió a leerse con detenimiento la obra de Willi Hennig *Grundzüge einer Theorie der phylogenetischen Systematik* (1950), ahora en su traducción inglesa (1966), donde exponía el cladismo, y se afianzó la taxonomía numérica, expuesta tres años antes por Robert Sokal y Peter Sneath. Si ésta se apoyaba en numerosos caracteres que, en su conjunto, ofrecieran un perfil cabal del grupo, el cladismo prescinde de cualquier divergencia potencial de similaridad física para reconstruir la filogénesis de los organismos.

La cuestión se prestaba a una algoritmización. Y eso es lo que se ha venido realizando desde las postrimerías de los años ochenta. De los contados programas manejados por los primeros ordenadores personales hemos pasado a los 200 útiles informáticos con que trabajan hoy los dedicados a la sistemática. A tres principales se reducen los métodos en uso. Se les denomina método de parsimonia máxima, método de distancia entre pares y método de máxima verosimilitud. El de parsimonia máxima reconstruye los estados de carácter ancestrales (nucleótidos o aminoácidos) en los puntos de ramificación del dendrograma y opta por la topología que requiere el menor número de cambios necesarios. Para todos los pares de secuencias, los métodos de distancia computan el número de sitios en que difieren. Por fin, los métodos de máxima verosimilitud son herramientas estadísticas que se proponen hallar la topología del árbol filogenético que maximiza la probabilidad de observar los datos. A éstos se ha incorporado un cuarto método, llamado de inferencia bayesiana, fundado en las probabilidades conjuntas del árbol, longitud de las ramas y sustituciones.

La pesca en la cultura de Harappa

Pese al parco conocimiento de la antigua cultura del valle del Indo, las representaciones pictóricas, los hallazgos óseos y los restos de artes sugieren que el pescado era una fuente importante de alimentación de esa histórica ciudad

Dietrich Sahrhage

La barca se desliza silenciosa sobre el agua. Acaba de despuntar el día. De la espesura del herbaje acuático llega de vez en cuando el ruido del aleteo de un ave o del movimiento de cualquier otro animal. El pescador, lanza en ristre, sigue con la mirada a un gran siluro que nada pegado al fondo de una de las innumerables derivaciones del Indo. Pronto el sol arderá en el cielo y sus reflejos en el agua dificultarán la pesca. En el zurrón hay ya dos barbos, caídos en los anzuelos, y ahora se apresta a coronar la faena con esa pieza espléndida. Levanta la vista hacia la orilla. ¿Qué ve? Un grupo de compañeros que, tras echar la red en torno a un banco de peces, la arrastran hacia la ribera. Cuando él acabe, les ayudará a abrir y limpiar las presas para conservarlas en salmuera y evitar así que el calor las pudra. Por un instante sueña en las cosas que puede adquirir con la venta de esas salazones en la ciudad. De su ensimismamiento lo saca la aproximación del siluro; lo captura de un potente arponazo.

Escenas como ésta del Pakistán actual se desarrollaban hace ya unos 5000 años. En el valle del Indo y en las zonas costeras surgió una civilización que, en atención a los principales yacimientos excavados, se ha dado en llamar la cultura Harappa. Por la misma época florecieron también las ciudades-estado de Mesopotamia y el imperio faraónico de Egipto.

Los arqueólogos conocen bastante bien la vida diaria en aquella cultura, pero apenas saben nada de su forma de gobierno y su religión, pues su escritura sigue siendo un misterio. A diferencia de los ejemplos egipcio y mesopotámico, sus protagonistas no dejaron relieves ni pinturas murales. Sólo permanecen restos de sus ciudades, dispuestas de forma cuadricular y con casas de barro cocido, amén de piezas de cerámica artística, herramientas, adornos y objetos de uso diario. También, desechos de comida.

Harappa y Mohenjo-Daro, en el actual Pakistán, fueron importantes centros de esta cultura. Se está excavando otra ciudad cerca de Dholavira, en el estado federado indio de Gujarat. ¿Quién organizó un sistema hidrológico tan avanzado, el abastecimiento de la población y el tráfico comercial? ¿Eran miembros de una casta nobiliaria o sacerdotal? Lo ignoramos. Sin una eficaz estructura de gobierno resulta difícil explicar un sistema fijo de medidas de longitud y de peso o un estilo unitario de los objetos salidos de sus talleres. Los tiempos parecen haber sido relativa-



1. CERAMICA de terracota —probablemente un amuleto— encontrada en Mohenjo-Daro (*abajo*). Representa una embarcación fluvial de la cultura de Harappa. Las embarcaciones-vivienda de los actuales nómadas fluviales del Indo son muy similares (*izquierda*).



mente pacíficos, pues no se han encontrado apenas indicios de enfrentamientos bélicos. Aunque no se han identificado todavía templos ni otros lugares de culto, sí han aparecido figuras simbólicas, humanas y animales, así como representaciones mitológicas acuñadas, que permiten deducir una creencia en el más allá, hipótesis respaldada además por las tumbas en las que junto al muerto se enterraron ofrendas.

Lo mismo que sucede en Egipto con el Nilo y en Mesopotamia con el Tigris y el Eufrates, el Indo arrastra desde regiones montañosas ingentes cantidades de lodo que se depositan en la llanura y generan un suelo fértil. Pero el río puede también provocar inundaciones devastadoras. En los campos prosperan el trigo y la cebada, cuyo cultivo conocían los habitantes desde finales del Neolítico. Por las semillas recuperadas sabemos que a su mesa llegaban, asimismo, sésamo, lentejas y uva. Cultivaban el lino y el algodón, con cuyas fibras unas manos expertas tejían telas para sus vestidos y redes para la pesca.

En las múltiples derivaciones y remansos del Indo, la desembocadura y las costas vecinas del mar Arábigo abundaba la fauna acuática. Criaban cerdos, ovejas, cabras y vacas; cazaban todo tipo de animales silvestres. Pero los peces, los cangrejos y los moluscos les ofrecían una opípara fuente de proteínas aparentemente inagotable. La importancia de la pesca explica que sus escenas decoraran las piezas de cerámica y esculpieran los sellos de acuñación.

Los restos de artes de pesca, las representaciones en cerámicas y el cotejo con las prácticas actuales de los habitantes de la región permiten conocer las técnicas que utili-



2. EN ESTE CUÑO DE ESTEATITA, desenterrado en la antigua ciudad de Mohenjo-Daro, figura, arriba en el centro, el pictograma de un pez, motivo muy frecuente.

Cronología de la cultura del Indo

3000 a.C.

• **Valle del Indo**: Los enclaves de Mehrgarh, Amri y Kalibangan son anteriores a la cultura Harappa.

• **Mesopotamia**: En las ciudades-estado sumerias de Eridu, Uruk, Ur y Lagasch se construyeron templos monumentales. Se desarrolló la escritura cuneiforme sobre tablillas de arcilla. Epopeya de Gilgamesch.

• **Egipto**: El Egipto superior y el inferior evolucionan hasta formar una unidad cultural. Menes funda la primera dinastía. Desarrollo de la escritura y del calendario.

• **Asia Menor**: Troya I: en el 2920 a.C. se funda una población rodeada de murallas.

• **Irán y región del Golfo**: Bajo la influencia de la cultura sumeria se instaura la escritura protoelamítica. Domesticación del camello.

2800 a.C.

• **Mesopotamia**: Desarrollo de la economía de los templos durante la época de Dschemdet-Nasr. Elaboración del bronce.

• **Egipto**: Imhotep, arquitecto. Pirámide escalonada de Djoser.

• **Europa del Norte**: Comienza la construcción de Stonehenge.

2600 a.C.

• **Valle del Indo**: Inicio de la época de máximo esplendor de Harappa, Mohenjo-Daro y otras ciudades (aproximadamente hasta el año 1900 a.C.).

• **Mesopotamia**: Tumbas de los reyes de Ur.

• **Egipto**: Imperio Antiguo con capital en Menfis. Bajo el faraón Keops se erige la primera pirámide de Giseh.

• **Asia Menor**: Se construye Troya II. De esta época procede el "Tesoro de Príamo".

2300 a.C.

• **Valle del Indo**: Relaciones comerciales con Mesopotamia y Magan (Oman).

• **Mesopotamia**: Sargón I funda el imperio de Akkad.

• **Egipto**: La sexta dinastía otorga una creciente independencia a las provincias, que desemboca en la desintegración del Imperio Antiguo.

• **Asia Menor**: Crecimiento y prosperidad de Troya.

1700 a.C.

• **Valle del Indo**: Las últimas ciudades son abandonadas por sus habitantes. Final de la cultura.

• **Mesopotamia**: Hammurabi promulga en Babilonia su código legislativo; sus tropas destruyen el palacio de Mari (año 1759 a.C.).

• **Egipto**: Caída del Imperio Medio con cambios muy rápidos de soberanos y crisis cultural. A partir del 1650 a.C., dominio extranjero de los hicsos, asiáticos de la parte oriental del delta del Nilo.

• **Asia Menor**: Troya VI es reconstruida y fortificada.

• **Europa**: Sobre el territorio continental griego y en el Egeo surge el reino micénico y minoico (Creta).

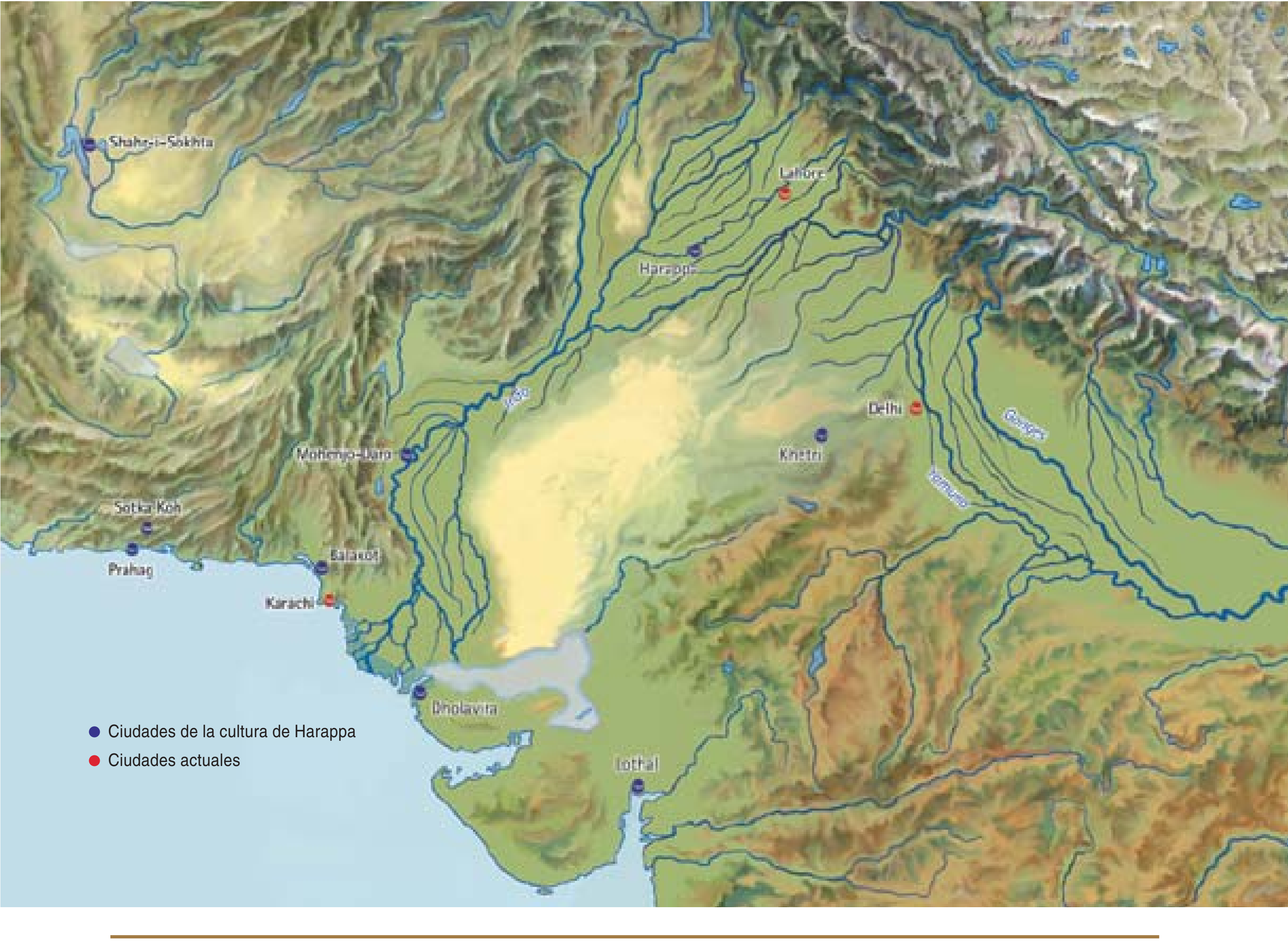
zaban para pescar. Los arqueólogos han encontrado anzuelos de cobre y puntas de flechas y de lanzas en los lugares más desarrollados de aquella civilización, lo mismo en la costa que tierra adentro. De acuerdo con los análisis químicos aplicados a tales hallazgos, el cobre empleado procedía de las antiguas minas de Khetri, en la actual India, unos 400 kilómetros al sudeste de Harappa. También se importaba cobre de Omán, entonces llamado Magan.

Se sabe que confeccionaban redes de pesca porque se han encontrado pesas de piedra y de arcilla como las que siguen empleando hoy los pescadores para las suyas. Con las pesas se mantenía la parte inferior de la red, mientras que la superior quedaba en alto mediante flotadores de madera o juncos; de ese modo, la trampa permanecía vertical en el agua formando una suerte de pared. Con el tiempo, la red y los flotadores se descompusieron. Lo mismo sucedió con las nasas, especie de cestas empotradas con aperturas cada vez más reducidas, de manera que los peces entraran sin dificultad pero no acertaran a salir. Nos corroboran su uso los dibujos de ciertos restos de cerámica, donde aparecen personas que llevan en sus manos tales artes. No menos espectacular fue el hallazgo de una red de casi 5000 años de antigüedad en Shar-i Sokhta, un poblado todavía existente junto a un lago sin desagüe situado en la zona fronteriza entre Irán y Afganistán. Estaba formada por hilos de lana artísticamente atados, con nudos cruzados, que tejían unas mallas de cuatro centímetros de lado. Por fortuna el clima seco semidesértico de la hondonada de Seistan ha permitido su conservación a lo largo de los milenios.

A través de las representaciones pictóricas conocemos también el tipo de embarcación utilizada. Hay ilustrado en cierto amuleto de terra-



3. YACIMIENTO DE PRAHAG, donde un grupo de arqueólogos franceses descubrieron en 1989 miles de huesos de peces y de fragmentos de cerámica de la época Harappa, con más de cuatro mil años de antigüedad.



La cultura del Indo

La cultura de Harappa recibe su nombre de una ciudad que viene excavándose desde 1921 y se halla situada a orillas del río Ravi, afluente del Indo. Experimentó su máximo esplendor entre los años 2600 y 1900 a.C. Sus huellas se rastrean desde el Beluchistán, en Pakistán, hasta Rajastán, en la India, y desde las montañas del Himalaya hasta las costas del mar Arábigo. Tras un laborioso trabajo, los arqueólogos han sacado a la luz, o al menos identificado, más del mil ciudades y poblados. En torno al año 1700 a.C. esta cultura avanzada comenzó a declinar. Las razones siguen siendo una incógnita. Algunos buscan los motivos en cambios climáticos, otros la atribuyen a terremotos o condiciones ambientales adversas (incendios), otros a la desaparición de los bosques debido a su explotación para extraer madera para construcción y combustible o la sobreexplotación por grandes rebaños. Tal vez, las ciudades tenían demasiados habitantes y escasearon los recursos.

cota una barca de quilla plana y costados altos, dotada de dos grandes timones en la popa y un habitáculo o tienda de campaña en el centro (*véase la figura 1*). Los actuales pobladores nómadas fluviales del Indo y su cuenca llamados *mohanas*, que para algunos investigadores son descendientes directos de las antiguas culturas del Indo, emplean barcas-vivienda con una construcción muy similar. Tal vez hubiera también embarcaciones de caña, como en Mesopotamia. Las relaciones comerciales habrían facilitado esa "transferencia de técnica", aunque dichas barcas no han podido perdurar los milenios transcurridos. Por último, algunos pequeños modelos construidos en terracota demuestran que los pobladores de la costa sabían pertrechar sus embarcaciones con quillas, mástiles y velas, posibilitándoles así los viajes marítimos.

¿Qué especies solían pescar? En las aguas interiores de Pakistán viven hoy más de 150 especies de peces, en su mayoría de la familia de los ciprínidos. Barbos y tencas, a pesar de que rara vez sobrepasan los 15 centímetros, suponen, por su número, un importante recurso. Entre los de talla mayor se preferían el catla, el tomahseer y el rohu, que pueden medir dos metros. Longitud que alcanza también el wallago, un siluro con un peso máximo de 45 kilos.

En las excavaciones del interior se han desenterrado huesos de pe-



4. COMO SUS ANTEPASADOS, los pescadores echan hoy sus redes en el río Indo. De la gruesa cuerda de juncos superficial pende la red. La creciente contaminación del agua puede significar el fin de la tradición.

ces, sobre todo vértebras y piezas craneales. A partir de estos restos de comida y desperdicios dejados por la cultura Harappa inferimos las especies y el tamaño de los animales consumidos. Por lo que parece, en los últimos 5000 años no se han producido cambios significativos en la composición de las comunidades que habitan en las orillas de las aguas interiores del Pakistán. Merced a los otolitos, podemos incluso determinar la edad de los individuos. Los otolitos son unas concreciones calcáreas, típicas de cada especie, alojadas en el aparato del equilibrio de teleósteos que presentan zonas de crecimiento anual, comparables a los anillos de crecimiento de los árboles. El recuento de estas zonas de crecimiento permite calcular la edad del pez.

Respecto a la fauna de las aguas costeras se llega a conclusiones similares: apenas ha experimentado cambios. En 1989, arqueólogos franceses descubrieron en Prahag, en la costa de Makran, un área de unos 120 por 15 metros que había quedado expuesta tras la retirada de una duna móvil. (Prahag se encuentra cerca de la ciudad de Pasni, a unos 800 metros de la actual línea del mar.) En medio de un panorama de dunas con arbustos resecos se hallaron miles de huesos de peces y otolitos que durante milenios la arena había cubierto, conservado y fijado en su sitio. Afloraron, además, fragmentos de vasijas de cerámica de la época Harappa. La mayoría de los huesos pertenecían a bagre titán, corballos, roncadores, rayas y pequeños escualos que todavía hoy caen en las redes de los pescadores del mar Arábigo. El hecho de que aparezcan restos de estos animales tierra adentro, como en Miri Qalat, una ciudad situada 120 kilómetros al norte de la antigua Prahag y en la propia Harappa a 900 kilómetros de la costa, sólo admite una explicación: la existencia de un activo comercio entre los habitantes de la costa y las ciudades del interior.

Un comercio de esa índole exige disponer de métodos para la conservación de alimentos perecederos. Los pescadores de Beluchistán conocen estos métodos: cortan las cabezas, abren los peces en canal, los parten longitudinalmente y colocan las dos mitades en un agujero hecho en tierra relleno de salmuera durante dos o tres días; luego, las secan al sol durante una semana o más.

Los huesos de Prahag aparecieron dispuestos según cierto orden, ocupando una serie de zonas circulares de unos 5 a 8 metros de diámetro. ¿Se habían depositado allí los peces para salarlos? Unas marcas de corte visibles en las vértebras de peces sua descubiertas en otro lugar, en la actual Balakot, cerca de la costa al noroeste de Karachi, proporcionan la información necesaria: se limpiaba en canal el animal y luego se cortaba a trozos; los peces secados hoy presentan las mismas marcas.

Los ríos, los lagos y el mar no sólo ofrecen peces a los pobladores de la cultura del Indo, sino también cangrejos, bivalvos y caracoles. Las duras conchas de los moluscos persisten durante milenios. A finales de la edad de Piedra se trabajaban ya en el área del valle del Indo para esculpir adornos u objetos del ajuar doméstico (vasijas o cucharas). En la época de la cultura de Harappa había talleres bien equipados en muchos lugares; en casi todos ellos se trabajaba según técnicas y estilos uniformes. Se utilizaban, de preferencia, las conchas de los caracoles de mar, que se transportaban desde la costa hasta los grandes centros de tierra adentro. Con las conchas de los caracoles los artesanos fabricaban cucharas que se colocaban junto a los cadáveres. Probablemente los sacerdotes, siguiendo



5. ESTE HALLAZGO causó gran sensación: el clima seco de la hondonada de Seistan permitió conservar los restos de una red datada en torno al año 2900 a.C. La red sirvió para pescar o atrapar aves.

El autor

DIETRICH SAHRHAGE, biólogo, trabajó durante años en la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación en Roma. De 1974 a 1988 dirigió el Instituto Pesquero del Centro Federal para las Investigaciones Pesqueras de Hamburgo, tarea que compartió con la docencia universitaria. Ha escrito varios libros sobre la historia de la pesca.

algún rito, las habían empleado para verter sobre ellos un líquido sagrado, dejándolas luego a su lado en la tumba. Conchas de caracoles dedal servían de vasijas y, con ellas también, se fabricaban figuras de juguete. Se aprovechaban los fragmentos para trabajos de incrustación. Con conchas de caracoles se tallaban pulseras, anillos y perlas, que tenían una gran difusión como adornos o amuletos. En el interior, estos objetos se distribuían a través de una extensa red



Pomadasys hasta

comercial que llegaba hasta Irán y Afganistán, donde se trocaban por oro, estaño y lapislázuli, y otras piedras semipreciosas.

Con finas sierras de bronce y taladros los artesanos extraían los husos centrales de la concha (columela) de los caracoles sankha y de los caracoles huso. Los transformaban en cilindros huecos que utilizaban como rodillo para sellado giratorio. Exportaban esas manufacturas hasta Omán y Mesopotamia. Las columelas de gasterópodos sankha halladas en Mesopotamia dan testimonio de las relaciones comerciales entre el valle del Indo y Mesopotamia, pues el hábitat de esa especie no alcanza, por el oeste, la costa de Makran, ni medra en el golfo Pérsico o Arábigo.

Lothal es una ciudad antigua de la India, pequeña y próxima al golfo de Cambay. Allí se han encontrado talleres para trabajos con caracoles de mar, cobre y cerámica. Y había, a lo que parece, un estanque de 214 por 33 metros levantado con muros de ladrillo cocido, provisto de una especie de entrada en un extremo y, en el otro, de un desagüe que se abría y cerraba. Algunos suponen que la estructura, junto con una plataforma de ladrillo adjunta y un gran almacén, servía de embarcadero. Lo cierto es que en el interior de la balsa se han recuperado conchas de moluscos marinos y anclas



Arius thalassinus

de piedra. Tal vez fuera Lothal uno de esos puertos desde los que se hacían a la mar los comerciantes en busca de mercados mesopotámicos.

Han aparecido allí también documentos escritos sobre la cultura de Harappa. Se trata de inscripciones en caracteres cuneiformes sobre tablillas de arcilla, donde se lee que el soberano Sargón I (alrededor de 2300 años a.C.) dispuso que los barcos procedentes de "Meluhha", probable denominación del territorio del Indo, navegaran por el Eufrates y, pasando por Ur, se dirigieran a la capital Akkad, para descargar allí su mercancía. En un cuño de rodillo se ve al rey junto a un intérprete procedente de Meluhha. Además de cobre, oro, lapislázuli y madera, en las tablillas figuran otros productos fabricados con conchas de caracoles. Por las inscripciones nos enteramos también de que Gudea, soberano de Lagasch en el país de Sumer, había mandado materiales nobles de Meluhha para la construcción del templo.

¿Qué productos recibían los comerciantes a cambio? Leyendo en tablillas de arcilla sabemos de la exportación de cereales, aceite, lana y tejidos, así como lingotes de plata para pagar las importaciones. Probablemente se enviara también a Meluhha harina de pescado prensada en bloques, para completar la producción local.



6. EL SILURO CAZADOR (*Wallago attu*, *arriba*) alcanza más de dos metros y es comestible. También *Arius thalassinus* y *Pomadasys hasta* se utilizaban como alimento en la cultura del Indo.

Sobre las relaciones comerciales entre el valle del Indo y Mesopotamia abundan los sellos de la cultura de Harappa encontrados en varias ciudades de Mesopotamia. Según parece, se cortaron las relaciones directas tras la caída del imperio de Akkad. El comercio se dirigió entonces, a través de Dilmun, hacia las islas de Bahrain y hacia Magan (Omán). Se mantendría hasta el año 1700 a.C. cuando, por razones desconocidas, se interrumpió.

Pasaron siglos sin fundarse ninguna nueva ciudad. Pero los conocimientos adquiridos en la explotación de los recursos del Indo y la irrigación artificial llegarían hasta nuestros días. Paradójicamente, el progreso constituye hoy su principal amenaza. Alrededor de 50.000 *mohanas* siguen viviendo en embarcaciones-vivienda en el lago Manchhar, un inmenso remanso del Indo. Sin embargo, cada vez son más los que abandonan sus casas. Las aguas residuales urbanas, la sal, los plaguicidas y los abonos han reducido la pesca en un 80 % y han contaminado el agua antes potable.

Bibliografía complementaria

DIE INDUS-ZIVILISATION. WIEDERENTDECKUNG EINER FRÜHEN HOCHKULTUR. Michael Jansen, Du-Mont, Colonia, 1986.

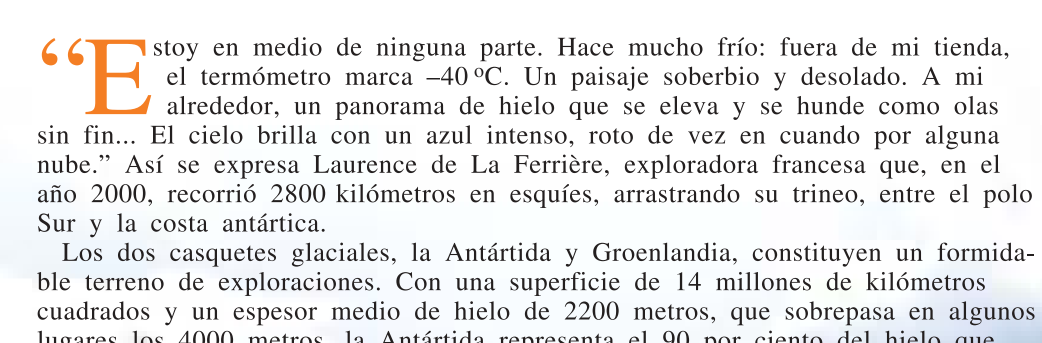
EN ROND OU EN LONG? AIRES DE DÉCOUPES DE POISSONS DU LITTORAL BALOUCHE (MAKRAN PAKISTANAIS). Jean Desse y Roland Besenval, en *Anthropozoologica* n.º 21, página 163; 1995.

Los casquetes polares

No son los inmensos bloques de hielo en reposo que se había creído. Junto con zonas estacionarias, los cruzan glaciares que se deslizan muy rápidos. Gracias a las observaciones por satélite se comprende mejor su dinámica

Frédérique Rémy y Catherine Ritz





“Estoy en medio de ninguna parte. Hace mucho frío: fuera de mi tienda, el termómetro marca –40 ºC. Un paisaje soberbio y desolado. A mi alrededor, un panorama de hielo que se eleva y se hunde como olas sin fin... El cielo brilla con un azul intenso, roto de vez en cuando por alguna nube.” Así se expresa Laurence de La Ferrière, exploradora francesa que, en el año 2000, recorrió 2800 kilómetros en esquíes, arrastrando su trineo, entre el polo Sur y la costa antártica.

Los dos casquetes glaciales, la Antártida y Groenlandia, constituyen un formidable terreno de exploraciones. Con una superficie de 14 millones de kilómetros cuadrados y un espesor medio de hielo de 2200 metros, que sobrepasa en algunos lugares los 4000 metros, la Antártida representa el 90 por ciento del hielo que cubre la Tierra. Si ese continente se fundiera, el nivel de los océanos subiría 70 metros. Cada año caen unas 2250 gigatoneladas de nieve. Tal masa de hielo corresponde a un volumen de agua de una altura de 6,5 milímetros en los océanos. Groenlandia, de un tamaño menor, almacena diez veces menos hielo; sin embargo, debido a un clima más húmedo y menos frío, cada año se depositan allí 500 gigatoneladas de nieve.

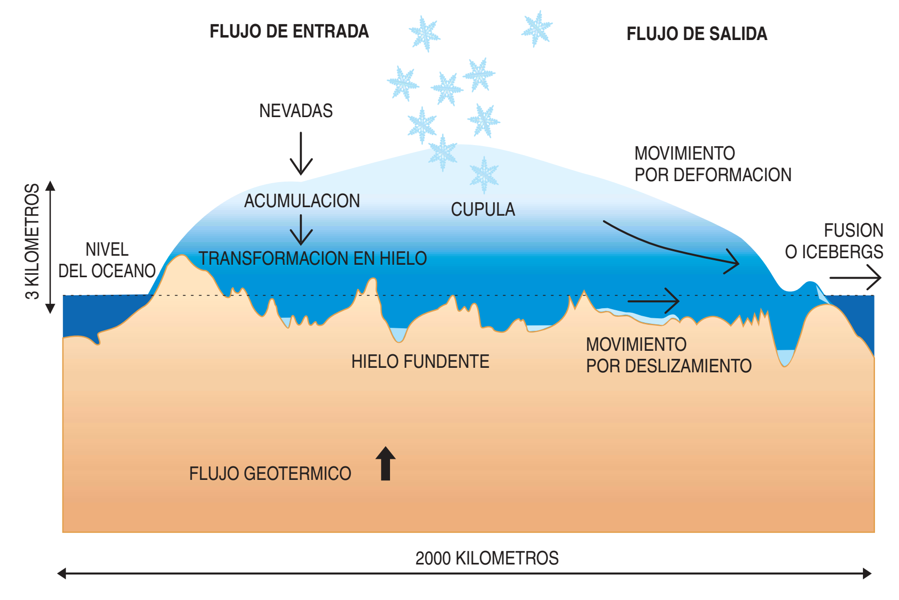
Ambos depósitos gigantescos de hielo se hallan sometidos a las variaciones del clima, que a su vez recibe, probablemente, el influjo de esas masas. ¿Cómo reaccionarán ante el calentamiento climático de los últimos decenios? Tal calentamiento engendra una elevación del nivel del mar estimada en 1,5 milímetros por año. Hoy día sólo se explican los dos tercios de esta subida. ¿Contribuyen la Antártida y Groenlandia? Para responder, los geofísicos se esfuerzan en elaborar modelos de la dinámica de los casquetes polares. Una tarea que tropieza con las mismas dificultades que encuentran quienes han de habérselas con mecanismos físicos múltiples. Con un obstáculo añadido: la ingente diversidad de las escalas de tiempo.

En efecto, las nevadas y otros fenómenos se siguen "en directo" de las variaciones climáticas, pero se necesitan decenas de millares de años para que una fluctuación de temperatura alcance el zócalo rocoso, a unos 3000 metros de profundidad. El hielo de los casquetes es, a un tiempo, inerte y sensible. Inerte, en razón del volumen en juego (todavía sufre los efectos de variaciones climáticas que acontecieron hace decenas de millares de años); sensible, porque basta una variación climática, por débil que sea, para perturbar el casquete y poner en juego cantidades de agua importantes. Para interpretar las medidas (velocidades de acumulación de la nieve, tamaño de los granos, etc.) debemos conocer la historia y el presente de la evolución del clima que reina en los polos.

Para establecer modelos de dinámica de los casquetes polares se requiere trabajar a una escala local, que nos permita comprender la dinámica de la acumulación de la nieve, por ejemplo, y a escala global, que nos posibilite evaluar las consecuencias del calentamiento sobre dichos casquetes.

En sus líneas generales parece una dinámica sencilla. La nieve que cae se comprime, se hunde poco a poco y se transforma en hielo. Después, se desliza muy despacio, por gravedad, desde el centro constituido por una vasta meseta sobreelevada (la cúpula) hasta el mar. Las velocidades de movimiento, muy pequeñas en el centro, alcanzan centenares de metros por año en los glaciares "emisarios", es decir, evacuadores de hielo. Frente a lo que se defendía diez años atrás, tales velocidades varían mucho de una zona a otra. Una vez en la costa, todo el hielo se desprende en icebergs si hablamos de la Antártida. En Groenlandia, la mitad del hielo se expulsa también en forma de icebergs, mientras que la otra mitad se funde en la banda costera, donde las temperaturas suben por encima de 0 ºC en verano.

Por último, los casquetes distan de ser macizos sólidos de hielo. Con una dinámica harto más compleja de lo previsto, la forma y el volumen de ambos casquetes están regidos por el equilibrio entre los flujos de entrada (las precipitaciones nivosas) y los flujos de salida (los icebergs y la fusión de los hielos). Se están acumulando numerosas observaciones para describir y cuantificar cada uno de tales fenómenos.



1. LOS CASQUETES POLARES no son sólidos cerrados. La nieve que cae en su superficie, se hunde y se transforma en hielo. Puesto que los casquetes polares tienen forma de paraboloide aplanado, el hielo fluye hacia la costa, sea por deformación, sea por deslizamiento, cuando la temperatura es cercana a los 0 ºC en la proximidad del zócalo terrestre (a causa del calentamiento debido al flujo geotérmico) y el hielo se funde. El nivel del mar determina el contorno del casquete e influye sobre la velocidad de flujo. Bajo el peso del hielo, la corteza terrestre se deprime y, cuando un casquete polar desaparece, el zócalo remonta (isostasia). Hoy, Escandinavia continúa remontándose pese a que el hielo desapareció de esa región hace 9000 años.

La observación de los casquetes polares

Las primerísimas estaciones meteorológicas automáticas se instalaron a comienzos del siglo XX. Pero la era de la observación "moderna" de Groenlandia y la Antártida arranca terminada la primera guerra mundial, en buena medida propiciada por el desarrollo de la aviación. Durante el decenio de los cincuenta se inicia el estudio sistemático de la altura y el espesor de los hielos. El hielo es transparente a las ondas de radio de baja frecuencia y opaco a frecuencias más altas. Cuando se envía una señal hacia el suelo, se refleja en la superficie del hielo o en la superficie del zócalo terrestre, según su frecuencia. Se mide el tiempo invertido por las ondas para realizar el trayecto de ida y vuelta, y se deduce la profundidad del hielo y su altura.

Mediante la comparación entre referencias colocadas sobre la nieve y otras fijadas sobre afloramientos

rocosos, se obtuvieron, por la misma época, las primeras estimaciones del movimiento de los casquetes glaciales. Se perforaron pozos para medir el gradiente vertical de temperatura, así como la temperatura a una profundidad de 10 metros. La temperatura de superficie fluctúa de –70 ºC en invierno a –50 ºC en verano en Vostok (Antártida). No obstante, se considera que la temperatura a –10 metros constituye una buena aproximación de la temperatura media anual local en superficie. Las precipitaciones anuales de nieve son proporcionales a dicha temperatura media. Contando las capas de invierno y las de verano se calculan las alturas de nieve acumuladas en los pozos. El grano de las capas invernales es menor que el de las estivales; dicho de otro modo, aquéllas son más densas que éstas.

Hacia mediados del decenio de los sesenta se emprendieron las primeras extracciones de testigos profundos, a más de 1500 metros. Puesto que el hielo se va acumulando, cuanto más hondo se perfore, más antigua será la muestra del mismo sacada. Las perforaciones arrancan así páginas del pasado. Revelan la temperatura, la composición y la presión del aire, amén de las concentraciones de impurezas y de aerosoles que reinaban en épocas precedentes.

De la relación entre las concentraciones de isótopos del oxígeno presentes en una capa se infiere la temperatura del aire: el agua que contiene el isótopo 16 se evapora antes que el agua compuesta de isótopo 18, disparidad que se acentúa con la disminución de la temperatura atmosférica. La concentración de oxígeno 16 en la nieve es más elevada durante períodos fríos. La concentración, la presión, las impurezas y los aerosoles se deducen de las burbujas de aire aprisionadas en los hielos. La perforación de Vostok ha suministrado así 420.000 años de historia climática.

Los testigos constituyen una fuente muy rica de informaciones, siempre y cuando puedan datarse las muestras. Las fechas se estiman a partir de las velocidades de acumulación. Si, por ejemplo, se cifra en un metro el espesor de nieve acumulada durante un año en determinada zona, se deduce que una profundidad de 200 metros corresponde a 200 años. No obstante, se trata de estimaciones bastante burdas: las velocidades de acumulación varían en el curso del tiempo, los hielos se mueven, etc.

Para salir al paso de tales imprecisiones en la datación se idearon los primeros modelos físicos de los hielos de los casquetes. Hoy día se toman las muestras en zonas planas, donde el deslizamiento es mínimo.



2. LOS VIENTOS CATABATICOS, extremadamente violentos, erosionan el relieve, remueven la nieve y crean dunas de nieve, llamadas *sastrugi*, cerca del polo Sur. Se ve la orientación del viento que alarga estas estructuras (*viene de la izquierda*). El difusímetro, que mide la velocidad del viento sobre el océano, es sensible a las orientaciones de la superficie y permite determinar también la dirección de los vientos que soplan sobre el hielo.

Medidas milimétricas por satélite

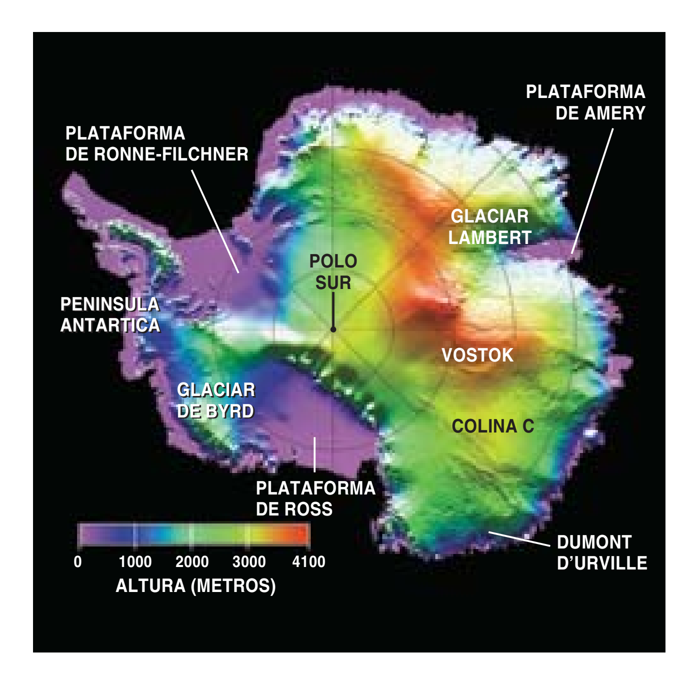
Los polos, inmensos y de difícil acceso, experimentan condiciones meteorológicas tan rigurosas, que las medidas *in situ* (observaciones meteorológicas, instalaciones de balizas y perforaciones) siguen siendo aisladas y cercanas a la costa. Se puede también determinar la altura.

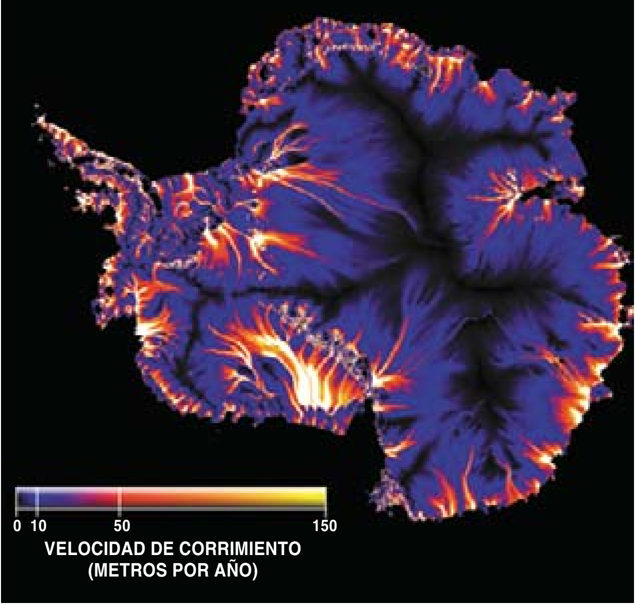
Los satélites se han convertido en los instrumentos predilectos para la observación de los casquetes polares. En el decenio de los sesenta, la Administración Nacional para la Atmósfera y los Océanos (NOAA) puso en órbita el satélite de observación en infrarrojos TIROS, equipado con sensores ópticos que fotografiaron por primera vez numerosas zonas desconocidas, en particular mares cubiertos de hielos.

Más tarde aparecieron los primeros sensores de radiación de alta frecuencia, capaces de observar a través de las nubes y durante la larga noche polar. Gracias a ellos, se efectúan medidas continuas a lo largo de todo el año y no sólo en verano. El ERS, uno de los primeros satélites con destino polar, enviado por la Agencia Espacial Europea en 1991, lleva a bordo cuatro instrumentos de ondas de alta frecuencia: el altímetro, para medir la altura del hielo; el difusímetro, para la dirección del viento; el radiómetro, captador pasivo que mide la radiación emitida por la superficie de hielo; y el radar de imágenes, que registra el movimiento de la superficie. El difusímetro obtiene la dirección del viento a partir de la orientación de las ondas formadas sobre la superficie del hielo. El radar de imágenes compara el tiempo que invierten dos señales en alcanzar la

Los autores

FRÉDÉRIQUE RÉMY y CATHERINE RITZ pertenecen al Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia. Rémy dirige el equipo de investigación del Laboratorio de estudios de geofísica y oceanografía espaciales (LEGOS), de Toulouse. Ritz presta sus servicios en el Laboratorio de glaciología y geofísica del entorno (LGCE), de Grenoble.





3. TOPOGRAFIA DE LA ANTARTIDA obtenida mediante el altímetro del satélite ERS (*a la izquierda*). La resolución horizontal es de cinco kilómetros y la precisión en la altura se aproxima al metro en las regiones centrales. Los puntos más altos, en el centro del continente, alcanzan 4100 metros. Gracias a este mapa del relieve, se han calculado las velocidades de movimiento del hielo (*a la derecha*). En ellas se ha considerado las cantidades de nieve acumulada y los espesores de hielo. En el centro, las velocidades de corrimiento son muy bajas y aumentan en la vecindad de la costa. Pero en las costas existen grandes diferencias. Hay zonas donde las velocidades sobrepasan los 200 metros por año que lindan con otras casi estacionarias. El glaciar Byrd, que se lanza sobre la plataforma de hielo de Ross, o el glaciar Lambert, que desemboca en la de Amery, son unos imponentes glaciares emisarios que evacuan cada uno millares de kilómetros cúbicos de hielo. Están rodeados por canales de corriente rápida, paralelos y espaciados unos cuarenta kilómetros.

superficie de hielo y reflejarse en ella hasta llegar al satélite, y deduce de ello la velocidad con que se mueve la superficie.

Estos instrumentos ofrecen una visión extraordinaria de los casquetes. De abril de 1994 a marzo de 1995, el ERS realizó unos 30 millones de mediciones; con ellas se ha reconstruido la topografía de la superficie de la Antártida con una resolución de dos kilómetros y una precisión en la altura del orden del metro. Gracias a estas observaciones efectuadas desde los satélites, se han mejorado los modelos de la dinámica de los casquetes polares.

Precipitaciones y acumulación de nieve

En los modelos, la cantidad anual de nieve acumulada sobre el casquete constituye el único flujo de entrada. La altura de la nieve medida por satélite no tiene en cuenta los corrimientos, ni representa, por tanto, la acumulada. Se investiga cómo evaluar la tasa de acumulación midiendo la nieve caída.

Las nevadas están controladas por mecanismos atmosféricos complicados y diferentes según la zona estudiada. En la estrecha banda costera, a menos de 1000 metros de altitud, las precipitaciones son altas, por término medio 35 centímetros por año. Domina la actividad ciclónica circumpolar (sistemas depresionarios que giran sin cesar en torno a los polos); cuando las masas de aire húmedo penetran sobre el continente y se elevan para franquear las montañas, se enfrían y nieva. En el centro, en cambio, nieva débilmente: 10 centímetros por año en promedio. El aire está allí más seco; la radiación emitida por el hielo enfría las nubes. Cuando hace mucho frío, las moléculas de agua forman cristales y nieva.

No toda la nieve depositada se acumula. En Groenlandia, una parte se funde a baja altura durante el verano. En la Antártida, la nieve no se funde, sino que es barrida por los vientos. El aire frío (–50 ºC) desciende a lo largo de las laderas y crea, por gravedad, vientos "catabáticos", fuertes y persistentes. En Dumont d'Urville, en la Antártida, por ejemplo, la velocidad media del viento es de 40 kilómetros por hora, aunque a veces se alcanzan los 200 kilómetros por hora. Estos vientos arrastran la nieve, la erosionan y crean lo que se llama *sastrugi*, dunas de nieve que perturban las mediciones. En una noche, puede levantarse una barrera de nieve alrededor de una baliza. Aunque a escala local estos vientos son primordiales, a escala global sólo una pequeña fracción de las precipitaciones se pierde en el océano bajo la forma de nieve barrida. Los vientos favorecen también la sublimación de la nieve, que en ciertas regiones constituye la causa dominante de la erosión del casquete. Deberíanse tomar en

consideración estos efectos en la evaluación del flujo de entrada, pero son difíciles de estimar.

Más complicada resulta todavía la determinación de las velocidades de acumulación, porque varían en el curso del tiempo, en función de la temperatura media del aire en superficie. Los testigos han mostrado que esta temperatura evoluciona por ciclos. A los períodos glaciales corresponden temperaturas inferiores en aproximadamente 10 ºC a las de hoy. Cada una de ellas ha durado varias decenas de millares de años. Inmensos casquetes recubrían entonces el norte de América (las Lauréntidas) y de Eurasia (la Fennoscandia). Cuando se produjo el último máximo glacial, hace 20.000 años, el nivel de los mares se hallaba 120 metros por debajo del actual.

Entre estos períodos glaciales se intercalaron cortos períodos cálidos (períodos interglaciales), que en general duraron unos millares de años. Esta alternancia glacial-interglacial proviene de la variación de la cantidad de energía solar que llega a la Tierra, es decir, de la órbita terrestre. Vivimos en un período cálido que comenzó hace unos 10.000 años.

Los testigos han mostrado también que las precipitaciones durante los períodos fríos eran dos veces menos abundantes que hoy. Se deduce de ello que las precipitaciones se dividen por dos —y, por tanto, también aproximadamente las velocidades de acumulación— cuando las temperaturas disminuyen en 10 grados. Las medidas de precipitaciones en el centro del continente, más frío, y en la costa, más templada, confirman esta estimación.

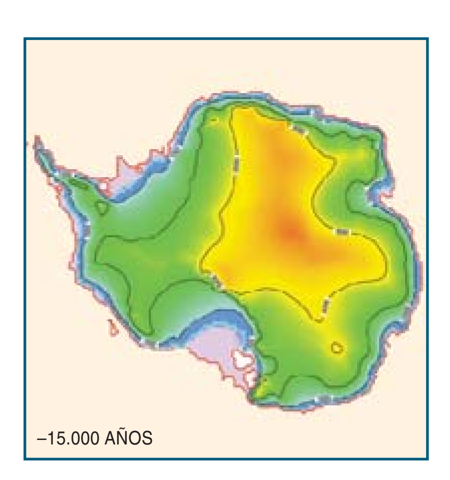
Podríamos también deducir las velocidades de acumulación del tamaño de los granos. En efecto, gracias a las medidas por satélite podemos medir el tamaño medio de los granos en los primeros metros bajo el hielo: los granos voluminosos atenúan más la señal reflejada. Ahora bien, los granos aumentan de tamaño con el tiempo, a medida que se hunden. Cuando se encuentran granos grandes a poca profundidad, ello significa que la nieve fresca no los ha recubierto y que ha nevado poco. Si no aparecen granos voluminosos más que a gran profundidad, quiere decir que ha nevado mucho.

Tratamos ahora de establecer el perfil del tamaño de los granos en función del tiempo. Conociendo su profundidad, podríamos establecer la velocidad de acumulación. Por último, se han construido gráficas de velocidad de acumulación basadas en mapas de temperatura y las observaciones. En total, la cantidad de nieve depositada cada año sobre el continente antártico se estima en 1800 gigatoneladas y en cerca de 450 gigatoneladas la que recubre las tres mayores plataformas de hielo (plataformas que resultaron del derrame de la nieve sobre el mar).

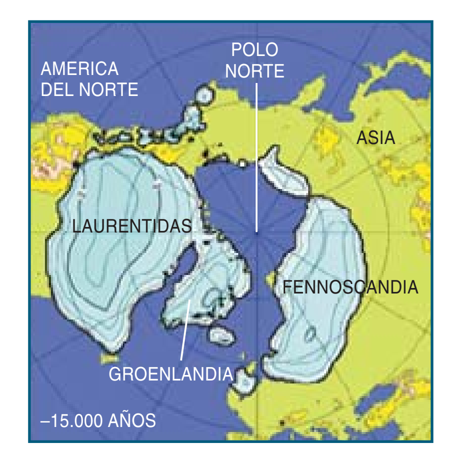
Drenaje y velocidad de salida

Hemos construido una gráfica de las velocidades de acumulación, es decir, del flujo de entrada. Nos falta estimar el flujo de salida, esto es, el movimiento de la nieve. Una vez caída, la nieve se hace más densa y se transforma en hielo. La transformación se desarrolla en los 100 primeros metros bajo la superficie a lo largo de varios miles de años, lo que es poco en comparación con las duraciones en juego en los casquetes polares. El hielo así formado se desliza por gravedad desde el centro del casquete hacia los bordes.

El hielo fluye al principio por deformación, a la manera de un fluido viscoso. Si damos un martillazo (un gran esfuerzo) sobre un trozo de hielo, éste se romperá. Pero si se aprieta contra él (pequeño esfuerzo) durante un tiempo prolongado, acabará por aplanarse. Así ha ocurrido con el casquete polar. Aunque la fuerza actuante —la gravedad— es pequeña, el







4. MODELADO de la Antártida hace 15.000 años, cuando el último máximo glacial (*izquierda*) y en la actualidad (*centro*). Las zonas de baja altitud (*en malva*) son menos extensas hoy, pues el nivel del mar ha subido. Se han reconstruido igualmente los casquetes del hemisferio norte en la época del último máximo glacial, hace 15.000 años (*derecha*). El casquete está representado en proyección polar, con América del Norte a la izquierda y Eurasia a la derecha. Los casquetes de hielo eran mucho más extensos: las Lauréntidas recubrían América del Norte y la Fennoscandia, el norte de Europa y de Asia. El nivel de los mares era entonces 120 metros más bajo; por eso algunas regiones, como el estrecho de Behring, emergían. Un inmenso mar de hielo recubría el polo Norte todo el año.

Medición directa del movimiento de los glaciares

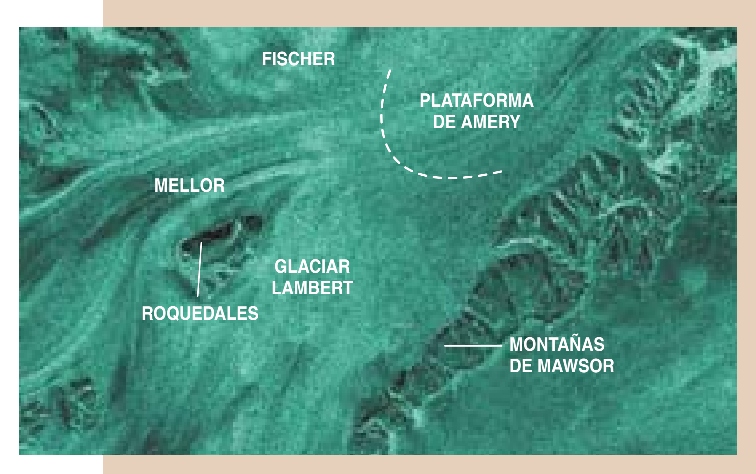
Entre los mayores glaciares del mundo se cuenta el Lambert. En la costa, desemboca en la plataforma de hielo flotante de Amery. Sus afluentes, Fischer y Mellor, son también importantes emisarios, es decir, vías rápidas de movimiento del hielo, cuya anchura alcanza a veces 80 kilómetros. Lo más frecuente es que estos glaciares se muevan a lo largo de valles presentes en el zócalo rocoso. El radar de imágenes del satélite europeo ERS ha proporcionado imágenes de estos glaciares.

El radar embarcado a bordo del satélite envía una onda de frecuencia muy alta y mide el tiempo que invierte en regresar al satélite, tras reflejarse en la superficie del hielo. La onda emitida barre la superficie del glaciar estudiado y la duración del retorno varía de un punto a otro en función de la altura del punto considerado. Se obtiene así una imagen (*arriba*) de la intensidad de la señal reflejada y de la fase ligada al relieve local.

El radar suministra también las velocidades de desplazamiento gracias al interferómetro, que mide el corrimiento relativo del glaciar visto en dos momentos diferentes. Se toma una primera imagen y después, 24 horas más tarde, una segunda. Si la superficie del hielo no se hubiera modificado, las dos imágenes serían idénticas. En realidad, el hielo se mueve y su superficie cambia. Las duraciones que la onda pone a disposición del satélite difieren de un día a otro para todos los puntos, excluidos los roquedales. Se combinan las dos imágenes de fases tomadas con 24 horas de intervalo para formar un interferograma (*abajo*). Se atribuye colores a los valores de las diferencias medidas para cada punto y aparecen franjas sobre la imagen. El movimiento de un punto entre las dos tomas se mide contando las franjas. Cada una corresponde a un corrimiento relativo de 28 milímetros. Cuanto más juntas estén, mayor será el corrimiento relativo. Se ve aparecer los glaciares emisarios y se miden sus velocidades de flujo.

Con el radar se identifica la línea de despegue (*de trazos*), a partir de la cual el hielo deja de reposar sobre el zócalo terrestre y comienza a flotar en el océano. Esta plataforma de hielo flotante (Amery), de varios centenares de metros de espesor, está sometida a la marea. Sube y desciende con una amplitud que alcanza 1,5 metros. La línea de despegue define la frontera del casquete polar (el hielo flotante no forma parte del casquete) y constituye un buen indicador de las variaciones climáticas: cuando el nivel medio de los océanos asciende, la línea recula hacia el continente y la masa del casquete glaciar disminuye. Los glaciólogos siguen las fluctuaciones de esta línea, excelente marcador de la dinámica de los casquetes.

Benoît LEGRESY, Laboratorio de estudios de geofísica y oceanografía espaciales de Toulouse (CNRS-CNES).





EL GLACIAR LAMBERT visto por el radiómetro del satélite ERS. Una sola imagen (*arriba*) muestra el relieve. Dos imágenes tomadas con un día de intervalo forman un interferograma (*abajo*). El número de franjas es proporcional a la velocidad de movimiento del glaciar. Las franjas entre el glaciar Lambert y los vecinos están muy próximas, así como las zonas entre el glaciar y las escarpaduras rocosas: el glaciar Lambert fluye a más de 600 metros por año. En cambio, el hielo junto al glaciar se mueve de manera lenta y regular (unos metros por año).

tiempo durante el cual opera es suficientemente largo para que el hielo se deforme y fluya hacia el mar. En un cuerpo viscoso de los llamados lineales, como el agua, la deformación es proporcional al esfuerzo. Ahora bien, el hielo es un cuerpo viscoso no lineal; la viscosidad depende del esfuerzo. Los glaciólogos aplican la ley de Glen, según la cual la deformación es proporcional al esfuerzo elevado a una potencia del orden de 3.

Pero la realidad es más complicada. De entrada, los parámetros de esta ley dependen de las características físicas de los cristales; por ejemplo, de sus defectos o de sus aglomeraciones de granos, que también varían en función de los esfuerzos y de la clase de hielo. En la parte superior de los casquetes, donde se registra un esfuerzo menor que en el centro, el valor de la potencia sería inferior a 3, mientras que para el hielo recristalizado de las capas próximas a la base, el exponente sería igual a 3. Finalmente, la viscosidad del hielo aumenta de forma

exponencial con la temperatura, según la ley de Arrhenius. Para un mismo esfuerzo, la deformación es 500 veces mayor a 0 ºC que a –50 ºC. Ahora bien, el casquete polar se halla sometido a diferencias de temperatura de ese orden: unos –60 ºC en la superficie y próxima a 0 ºC en el contacto con el zócalo terrestre, donde el flujo geotérmico que asciende del centro de la Tierra calienta el hielo.

Para calcular el flujo, se toma igualmente en consideración los gradientes de temperatura entre la superficie y la base. Las temperaturas del hielo dependen, asimismo, de la velocidad de flujo: aumentan con la deformación y, por tanto, con la velocidad de movimiento (cuando se retuerce un trozo de plástico, se calienta). Cuanto más alta es la temperatura, más se deforma y fluye el hielo.

El hielo no fluye sólo por deformación, sino también por deslizamiento sobre el zócalo cuando la temperatura en la base alcanza el punto de fusión del hielo. Se comprueba en el "lago" de Vostok, el mayor lago subglaciar del mundo. Está situado a una profundidad de unos 3000 metros y se extiende a lo largo de más de 300 kilómetros de longitud y 40 kilómetros de anchura.

El hielo fluye según la línea de máxima pendiente de la superficie, indicada por las observaciones topográficas. Se estima el gasto de hielo en función de la pendiente y de la velocidad de acumulación de la nieve depositada desde una cúpula (una meseta). Se deduce de ello una velocidad media de flujo, teniendo en cuenta el espesor local del hielo. Hemos construido ya una cartografía de las velocidades medias de flujo calculadas para la Antártida.

El flujo no es tan regular ni tan uniforme como antaño se creía. Las velocidades, pequeñas en el centro (inferiores a un metro por año), aumentan hasta alcanzar 100 metros por año en la periferia. Estas velocidades, irregulares, dependen del relieve. Se observa la existencia de canales de flujo rápido, siempre dirigidos del centro hacia el mar, donde el flujo es de 10 a 100 veces superior a los vecinos, distantes apenas centenares de metros. El efecto de tales "autopistas del hielo" se hace sentir a varios centenares de kilómetros del interior del continente. Estos canales evacuan un volumen de hielo muy importante: más del 80 por ciento de los hielos se lanzan al mar transitando por estas vías rápidas que cubren sólo el 20 por ciento de las costas.

El hielo que fluye, por deformación o por deslizamiento, representa el flujo de salida. En la proximidad del mar, se funde o se desprende en forma de icebergs. Dependiendo del equilibrio entre los flujos de salida y de entrada, el casquete es estable, aumenta de volumen o se funde. Eso es lo que abordan ciertos climatólogos cuando modelan las consecuencias del calentamiento climático.

Los casquetes no se funden

¿Cómo reaccionan los casquetes polares al cambio climático? Los modelos anuncian un calentamiento cuyos efectos variarán de una región a otra, si bien todos predicen un aumento de la temperatura en los polos. Ya ahora, las mediciones, cada vez más numerosas, muestran que disminuyen la extensión y el espesor de los hielos en los mares que rodean el Artico. Indican también que el nivel de los océanos ha subido 15 centímetros desde el comienzo del siglo XX. Un tercio de esta alza se debe a la dilatación térmica de las aguas. Otro tercio provendría de la fusión de los glaciares templados. Se ignora el origen del tercer tercio. ¿Provendrá de los casquetes polares?

La elevación de temperatura de 0,6 ºC observada en la Antártida desde comienzos del siglo XX ha traído un aumento de las precipitaciones cifrado entre un tres y un cinco por ciento. Al hacer frío, el hielo no se funde y la cantidad de hielo depositada provoca el descenso del nivel del mar en –0,2 milímetros por año. En el centro de Groenlandia, el fenómeno sería idéntico; en cambio, el hielo se funde en las costas. Globalmente, Groenlandia se deformaría sin por ello aportar una contribución notable a la variación del nivel de los océanos.

Sabemos ya que el hielo acelera su tasa de flujo con el aumento de la temperatura, pero los efectos de una variación de temperatura se aprecian varias decenas de millares de años después. Los casquetes sufren todavía los efectos del último calentamiento del clima que comenzó hace 10.000 años. Así, la deposición de nieve en el centro depende de las temperaturas "altas" actuales y la nieve tiende a acumularse de forma importante. En cambio, las velocidades de flujo ligadas a las capas más profundas corresponden todavía a las temperaturas del último período glacial: el flujo es más bien lento. La nieve se acumula más deprisa de lo que fluye; por tanto, el centro continúa espesándose.

El misterio del agua que falta

El postrer factor a considerar en el calentamiento climático es el océano. Cuando el hielo llega del continente a la costa, puede traer espesor suficiente para reposar sobre el zócalo; si no, flota. Si el océano es poco profundo, el hielo "avanza"; en caso contrario, forma plataformas de hielo flotantes (los *ice-shelves*). Así, en la Antártida, los tres golfos principales están ocupados por plataformas de hielo (Ross, Filchner-Ronne y Amery). Al limitar el flujo del hielo casquete arriba, estas plataformas desempeñan un papel clave en el funcionamiento de los casquetes. Cuando se produce un descenso del nivel del mar, las plataformas reposan sobre el fondo. Como el flujo del hielo sobre tierra es más lento que el del hielo flotante, el casquete de hielo se hace más espeso. A la inversa, cuando el nivel del mar sube, los hielos que reposan sobre el zócalo se desprenden del fondo y las plataformas de hielo se extienden más. Esto repercute hasta el interior del casquete, pues, por una parte, los hielos flotantes influyen sobre la salida del hielo del continente, pero, por otra, el agua que se infiltra bajo las plataformas probablemente las calienta y acelera su fusión. Los glaciólogos admiten que las variaciones del nivel de los mares gobiernan el volumen de la Antártida en escala de varios millares de años.

Todas las medidas obtenidas por satélite confirman estos supuestos. En Groenlandia, el centro se eleva 10 centímetros por año (nieva más), mientras que los bordes disminuyen en el mismo orden de magnitud (se funden). El calentamiento climático actual domina la dinámica de Groenlandia, sin contribuir a la elevación del nivel de los mares. En cuanto al Antártico, la aceleración de las velocidades de los glaciares emisarios se haría sentir en el interior del continente, pero seguiría siendo moderada. Provendría del último calentamiento climático y no del que nosotros estamos viviendo ahora.

En la actualidad, ni los modelos ni las observaciones de satélites indican que los casquetes polares contribuyan a la elevación del nivel del mar. Mas ese dato, en parte tranquilizador, no resulta satisfactorio, porque se sigue ignorando el origen del tercio del volumen de agua añadido a los océanos. ¿De dónde procede? Esta pregunta preocupa a los climatólogos, los oceanógrafos y los glaciólogos. Gracias a las recientes observaciones, se ha descubierto que los casquetes polares eran dinámicos, pero sin aportar la prueba de que fundan: el origen del "agua que falta" queda por explicar.

Bibliografía complementaria

SENSITIVITY OF A GREENLAND ICE SHEET MODEL TO ICE FLOW AND ABLATION PARAMETERS: CONSEQUENCES ON THE EVOLUTION THROUGH THE LAST CLIMATIC CYCLE. C. Ritz, A. Fabre y A. Letréguilly, en *Climate Dynamics*, vol. 13, págs. 11-24, 1997.

CLIMATE AND ATMOSPHERIC HISTORY OF THE PAST 420.000 YEARS FROM THE VOSTOK ICE CORE, ANTARCTICA. J. R. Petit *et al.* en *Nature*, vol. 399, págs. 429-436, 1999.

TOPOGRAPHIE DES CALOTTES POLAIRES PAR ALTIMÉTRIE SATELLITE. F. Rémy, L. Testut, B. Legresy, en *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, n.º 333, págs. 457-467, 2000.

Roland Lehoucq y Jean-Michel Courty

Física del remo

En agosto de 2001, ocho atletas franceses alcanzaron el campeonato mundial de remo en la categoría de "pesos ligeros", tras haber remado 2000 metros a la velocidad media de 21,4 kilómetros por hora. ¿Cómo lo lograron? Los remeros impulsan su embarcación apalancándose en el agua con ayuda de los remos. Se sientan de cara a la popa del esquife y hunden los remos en el agua con la mayor "suavidad" posible antes de cada estrepada. Para disminuir el número de inmersiones del remo en el agua, descansan sobre banquetas móviles; hunden los remos cuando tienen las piernas plegadas y los sacan cuando, echados hacia atrás, extienden las piernas. Esa combinación de movimientos amplía el trayecto de los remos, de forma que el efecto de palanca se prolonga.

Lanzado el esquife, el objetivo de los remeros es compensar, merced a un esfuerzo continuo y regular, el retardo natural del movimiento debido a los distintos frotamientos líquidos. A simple vista, las causas de pérdida de energía son numerosas: cada remo frota con el agua y los remos ceden una parte de su cantidad de movimiento al líquido, perdiéndose así una pequeña fracción de la energía desarrollada por el remero. Minimiza éste dicha pérdida "apoyándose" en el agua más que poniéndola en movimiento. Saben los expertos que lo esencial de la resistencia al avance procede del frotamiento del casco con el agua y de la ola, llamada de estrave, creada por delante de la embarcación.



En las condiciones de calma habituales en las competiciones, la fuerza de frotamiento es igual al cuadrado de la velocidad de la embarcación multiplicado por el valor de su superficie sumergida y por cierto coeficiente de estructura. Como indica su nombre, ese "coeficiente de estructura" depende de la textura y de la forma de la parte sumergida del casco; el material ultraliso y la forma alargada y afilada con que se construyen las embarcaciones de competición rebajan ese coeficiente y reducen las olas y remolinos. Según el principio de Arquímedes, el volumen sumergido es igual a la masa de la embarcación dividida por la densidad del agua. Para que el volumen, y por tanto la superficie sumergida, y por tanto los frotamientos, se reduzcan en todo lo posible, los constructores aligeran al máximo los esquifes: el peso de un esquife (embarcación de un solo remero) es de apenas 20 kilogramos, el de una barca de ocho remeros excede poco de 100 kilogramos.

Para que la embarcación avance a determinada velocidad, los remeros deben suministrar una potencia constante igual a la potencia desarrollada por la fuerza de rozamiento. Como ésta es proporcional al cuadrado de la velocidad de la embarcación, la potencia de propulsión necesaria (fuerza multiplicada por la velocidad) crece con el cubo de esa velocidad. Cuando los remeros redoblan sus esfuerzos, la velocidad la aumentan... sólo un 26 por ciento. Una comparación entre las marcas de un remero medio y las de un campeón ilustra mejor el fenómeno: solo en su esquife, un remero alcanza y mantiene unos 14 kilómetros por hora. Durante el esfuerzo, gasta 250 watt. Sin embargo, si desea llegar a campeón, le es necesario casi doblar esa potencia. Entonces aumentará su velocidad en... sólo 3,6 kilómetros por hora. Lanzado a los 2000 metros a una velocidad media del orden de 17,6 kilómetros por hora, un campeón de esquife mantiene tan considerable esfuerzo durante siete minutos.

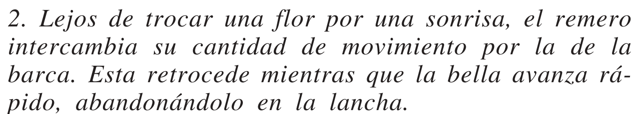
Conversión potencia/velocidad

La exigua conversión potencia/velocidad explica que un "ocho" sea muy poco más rápido que un "esquife". Comparemos las marcas de los campeones del mundo en una barca de ocho con la de los campeones de esquife para la misma



1. Agachándose y estirándose, el remero alarga el movimiento de palanca sobre el agua, merced al cual impulsa la embarcación.





2. Lejos de trocar una flor por una sonrisa, el remero intercambia su cantidad de movimiento por la de la barca. Esta retrocede mientras que la bella avanza rápido, abandonándolo en la lancha.



3. Los ergómetros son máquinas de remar que imitan a los remos: a los esfuerzos del remero oponen una potencia de frenado proporcional al cubo de la velocidad de su volante de inercia.

distancia. Los primeros suministraron una potencia propulsora total vecina a 4000 watt, que sirvió para tirar del peso de la embarcación más el del timonel y los remeros. Unas nueve veces más pesada que un esquife, su embarcación se veía frenada en proporción a la superficie mojada, que varía aproximadamente con la potencia 2/3 del volumen sumergido: la de una embarcación de ocho remeros es, por tanto, unas 4,33 ($9^{2/3}$) veces mayor que la de un esquife. Así, mientras que los ocho remeros generan una potencia unas ocho veces mayor, su peso y el del timonel generan un rozamiento 4,33 veces mayor. Suponiendo que cada miembro del equipo suministre la misma potencia que un remero de esquife, la velocidad de una embarcación de ocho es igual a la del esquife multiplicada por la raíz cúbica del cociente 8/4,33, lo que supone un aumento de sólo 23 por ciento. Razonando así, deducimos que la velocidad de una embarcación de ocho remeros, que mantienen una velocidad de 17,6 kilómetros por hora en un esquife, es aproximadamente de 21,6 kilómetros por hora, valor cercano a los 21,4 kilómetros por hora alcanzado por los campeones.

Para aprovechar óptimamente la energía del equipo, el timonel procura que la velocidad de la embarcación sea constante en lo posible a lo largo de la carrera, mientras los remeros se esfuerzan en mantener constante esa velocidad durante cada uno de sus movimientos sincronizados.

La deseada regularidad

Para mostrar el efecto beneficioso de la regularidad sobre las marcas, examinemos una situación concreta. Tomemos el caso de una lancha que avanza a un metro por segundo con una potencia propulsora de cinco watt. Como ésta es proporcional al cubo de la velocidad, la potencia propulsora necesaria para que ese mismo esquife avance a 3 metros por segundo es de 5 veces 3^3, o sea, 135 watt. Un remero que quisiera cubrir 600 metros en 200 segundos debería suministrar dicha potencia durante ese tiempo, consumiendo así una energía de 135 × 200, o sea, 27.000 joule. Sin embargo, ese mismo remero podría también preferir avanzar a dos metros por segundo durante la mitad del tiempo, para doblar la velocidad durante el tiempo restante. Habría entonces que desarrollar 40 watt durante la mitad del tiempo, pasar luego a 320 watt, y consumir en total una energía de 40 × 100 + 320 × 100, o sea, 36.000 joule. ¡Este valor es mayor en un 33 por ciento a la energía de 27.000 joule correspondiente a una velocidad de tres metros por segundo!

Tan apreciable diferencia se debe a la relación de proporcionalidad que liga la potencia propulsora no a la velocidad, sino al cubo de la velocidad. Existe una “velocidad ideal” para la cual los atletas recorren en un tiempo mínimo la distancia de carrera, a la vez que consumen la energía máxima que pueden generar; toda “diferencia” entre esta velocidad ideal y las velocidades instantáneas “retarda al remero”. Si por consideraciones tácticas los contendientes modificaran su velocidad durante la carrera, la capacidad de regular la velocidad ya no sería el factor determinante de la victoria.

En la práctica, una regularidad de movimientos perfecta es casi imposible: cada remero no suministra un esfuerzo continuo porque los remos están fuera del agua la mitad del tiempo. Sin embargo, la secuencia de movimientos de los especialistas del remo les permite, pese a todo, mantener casi constante la velocidad. ¿Cómo? Si sólo emplearan los brazos, la velocidad del esquife disminuiría durante el “tiempo de deslizamiento”, cuando los remos están fuera del agua. Sin embargo, tras el “tiempo motor”, durante el cual el atleta tira de sus brazos para propulsar la embarcación y despliega el cuerpo, el remero iza los remos antes de encoger las piernas hacia atrás a la vez que empuja los brazos y los remos hacia adelante. Como reacción, la embarcación se desplaza hacia adelante más deprisa que el remero, ya que su masa, de unos 20 kilogramos para un esquife, es menor que la del remero, de unos 80 kilogramos. Los buenos remeros saben “escalonar” sus movimientos de piernas para mantener casi constante la velocidad del es-

quife durante la fase de deslizamiento.

Los atletas del remo trabajan en el agua para mejorar su técnica. Para reforzar su potencia física se ejercitan, en el gimnasio, con el ergómetro. Esta máquina de remar simula los esfuerzos que en el agua realiza el deportista, quien se acomoda en un asiento corredizo y tira de una cadena que arrastra un volante de inercia. Cuando dobla las piernas para encogerse mientras estira los brazos, un mecanismo de retroceso arrolla la cadena a la vez que el volante de inercia gira libremente. Cuando se despliega para tirar, unas aletas solidarias de la rueda transforman el volante en una especie de ventilador. Una válvula regula la entrada de aire y hace variar a voluntad la intensidad de la fuerza de rozamiento. Al final, la energía que el deportista debe suministrar al sistema es proporcional al cubo de la velocidad de giro del volante, que así simula la de un esquife en el agua.

Los aparatos de gimnasio ofrecen la ventaja de ser más fáciles de instrumentar que las embarcaciones. Gracias a sus calculadoras electrónicas, los ergómetros informan a los practicantes de sus marcas. Para ello, basta con la simple medida de la velocidad de la rueda. Así, cuando el deportista retorna a la posición encogida, la velocidad de la rueda disminuye. A partir de esa disminución, la calculadora determina la potencia disipada por los frotamientos, es decir, la potencia desarrollada por el deportista. Los ergómetros estiman también una velocidad equivalente de embarcación y una distancia equivalente de recorrido, lo que permite al deportista de gimnasio reconocer (o imaginar) las sensaciones experimentadas al aire libre. No obstante, la marcha de la "embarcación equivalente" es menor que la de una embarcación real a bordo de la cual el remero desarrollara un esfuerzo igual. En el gimnasio, el remero debe acelerar su cuerpo hacia adelante y luego hacia atrás, lo que le cuesta una potencia media de unos 40 watt, que no contribuye a lo que indica el velocímetro.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

La paradoja de los dos sobres

El mes pasado abordábamos, junto con otros problemas de probabilidad, la paradoja de los dos sobres. El presentador de un concurso enseña dos sobres a un concursante. En uno de ellos ha introducido cierta cantidad de dinero y en el otro el doble de dicha cantidad. El concursante elige uno de los dos sobres, lo abre y comprueba que hay 100 euros. El presentador le ofrece ahora la posibilidad de cambiar de sobre. ¿Cuál es la mejor estrategia para el concursante?

Un argumento muy simple nos indica que el concursante debe cambiar de sobre. En efecto, en el sobre cerrado puede haber o bien 200 euros o bien 50. Si cada una de estas posibilidades es igual de probable, entonces el valor medio del dinero contenido en el sobre cerrado es (200 + 50)/2 = 125, que es superior a 100 euros. El argumento es válido cualquiera que sea la cantidad encontrada en el primer sobre. Si esa cantidad es x, en el segundo sobre puede haber $2x$ o $x/2$; si ambas posibilidades se dan con la misma probabilidad, el valor medio del dinero contenido en el segundo sobre será $(2x + x/2)/2 = 5x/4$, que es mayor que x. Por tanto, cambiar de sobre es siempre ventajoso. Resulta innecesario entonces mirar el contenido del primer sobre, ya que la decisión correcta es siempre cambiar. Pero esta conclusión es absurda, puesto que el mismo argumento se podría aplicar una y otra vez, sin abrir los sobres, y nos aconsejaría cambiar de uno a otro, con la disparatada pretensión de aumentar el valor medio de nuestra posible ganancia cada vez que cambiamos de sobre.

¿Dónde reside el error del argumento expuesto? El error consiste en suponer que las dos posibles cantidades para el segundo sobre, 200 o 50 euros, se dan con la misma probabilidad. En principio parece una suposición razonable, puesto que lo único que sabemos es que en uno de los sobres hay el doble de dinero que en el otro, pero no sabemos nada acerca de cómo se ha elegido la cantidad encerrada en cada uno de ellos.

Si, por ejemplo, sabemos que en el concurso no se van a utilizar céntimos de euro y obtenemos 99 € en el primer sobre, podemos inferir inmediatamente que en el segundo sobre habrá 198 €, ya que no puede contener 49,5 €. Cuando no conocemos cómo se han elegido las cantidades depositadas en los sobres, nada puede indicarnos si una de las dos posibilidades es más probable que la otra, de modo que lo más sensato es considerar que cada una tiene una probabilidad 1/2 de ocurrir. Sin embargo, se puede demostrar que la suposición es incorrecta, cualquiera que sea el procedimiento seguido para elegir las cantidades depositadas en los sobres. Vamos a ver primero un ejemplo que nos ayudará a entender el problema.

Imaginemos que las cantidades depositadas en los sobres se eligen de la siguiente forma: se toma al azar una cantidad entera (sin decimales) de euros entre 0 y 1000 €. Se introduce en un sobre dicha cantidad y en el otro el doble. Supongamos que el concursante conoce el procedimiento descrito. Si en el primer sobre encuentra una cantidad superior a 1000 €, es evidente que no debe cambiar de sobre. Si encuentra una cantidad x igual o inferior a 1000 € y *par*, entonces en el otro sobre puede haber o bien $2x$ o bien $x/2$; ambas posibilidades se dan con probabilidad 1/2. Se trata en este caso de una situación similar a la descrita al principio del artículo y la conclusión es la misma: el concursante debe cambiar de sobre.

Finalmente, si encuentra una cantidad inferior a 1000 € e *impar*, en el segundo sobre tiene que haber el doble de dicha cantidad; por tanto, lo más conveniente será cambiar.

Resumiendo: si el concursante encuentra en el primer sobre una cantidad superior a 1000 €, entonces no debe cambiar, mientras que si encuentra una cantidad igual o inferior a 1000 €, deberá cambiar de sobre. Como vemos, en el segundo sobre puede haber $2x$ o $x/2$, pero las dos posibilidades tienen la misma probabilidad sólo en el caso en que x sea igual o inferior a 1000 € y par. Si x es impar, entonces la posibilidad $2x$ tiene probabilidad 1 y la posibilidad $x/2$ tiene probabilidad nula. Por último, si x es mayor que 1000 € (y necesariamente par), entonces la posibilidad $x/2$ se da con probabilidad 1 y la posibilidad $2x$ no se da nunca.

¿Puede haber un procedimiento de elección de las cantidades en el que, para cualquier x, las dos posibilidades, $2x$ y $x/2$, se den con probabilidad 1/2? En un procedimiento de este tipo el 100 tendría que ser igual de probable que el 50 y el 200, y, a su vez, igual de probable que el 25 y el 400, y así sucesivamente. En otras palabras, todos los números de la secuencia infinita: ..., $x/8$, $x/4$, $x/2$, x, $2x$, $4x$, $8x$,... tendrían que aparecer con la misma probabilidad. Pero no existe un procedimiento capaz de extraer números de una secuencia infinita con igual probabilidad. Por eso, el argumento que dábamos al principio del artículo es incorrecto no sólo para ciertos procedimientos de elección de las cantidades, sino para cualquier procedimiento imaginable.

Pero, ¿qué ocurre cuando el concursante desconoce por completo el procedimiento seguido para elegir las cantidades de los sobres? ¿No hemos de suponer que las dos posibilidades, $2x$ y $x/2$, son igualmente probables? ¿Por qué habría de ser más probable una que otra? Lo que sabemos es que la probabilidad de cada una de esas posibilidades depende de la cantidad encontrada en el primer sobre, aunque el concursante no puede cal-

cular dicha probabilidad. No al menos en el primer intento.

Si el juego se repite varias veces, el concursante puede utilizar las cantidades que salen en cada turno y estimar la probabilidad con la que aparecen, es decir, tratar de "deducir" el procedimiento seguido para elegir dichas cantidades. Al incorporar la información de los turnos jugados, el concursante puede elaborar un criterio de decisión similar al que hemos obtenido en el ejemplo anterior. Sin embargo, en su primer turno de juego, los dos sobres son equivalentes.

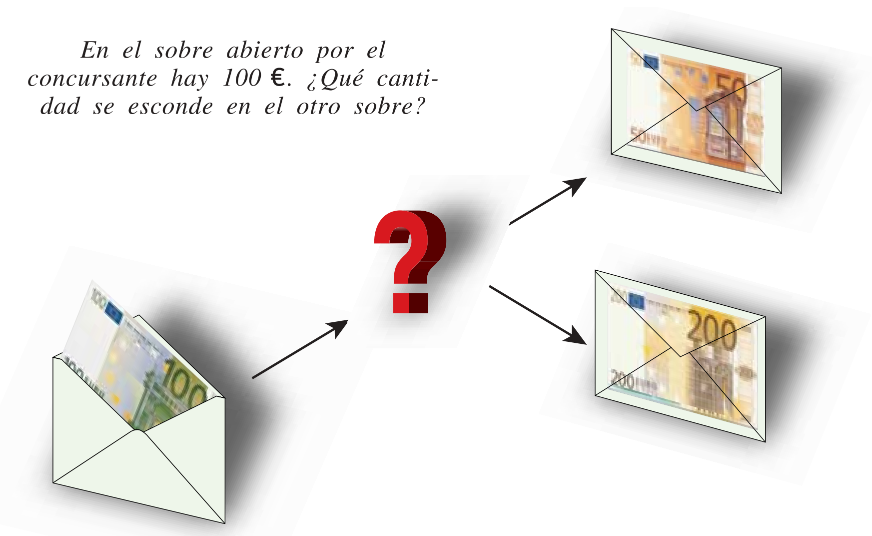
Otra objeción a nuestra crítica del argumento inicial podría ser la siguiente: ¿es realmente necesario un procedimiento para obtener las cantidades de cada sobre? ¿No se puede elegir en cada turno un procedimiento distinto? Esta objeción está relacionada con cuestiones básicas de la teoría de la probabilidad. Lo que hemos llamado hasta ahora "procedimiento" no es más que una cierta distribución de probabilidad para la cantidad depositada en uno de los dos sobres (la cantidad depositada en el otro sobre es simplemente el doble de la primera).

Que exista un "procedimiento" es lo mismo que decir que existe tal distribución de probabilidad. Esto equivale a que, si se repite el juego un gran número de veces, la frecuencia con la que aparecen las distintas cantidades posibles tiende a un cierto número al que llamamos probabilidad. Así ocurre, por ejemplo, cuando se lanza un dado no trucado un gran número de veces, pongamos 6000: cada uno de los seis números sale unas 1000 veces, aproximadamente, es decir, un sexto de las tiradas; cuantas más veces se lanza el dado, más se aproximan las frecuencias a este valor "ideal" o probabilidad, que es igual a un sexto. En nuestro caso, aunque eligiéramos al azar en cada turno el procedimiento por el cual se deciden las cantidades de los sobres, estos procedimientos al azar darían lugar a una cierta distribución de probabilidad, es decir, podrían considerarse como un único procedimiento.

Veamos, por último, una interesante modificación de la paradoja. En lugar de introducir en uno de los sobres el doble de dinero que en el otro, podemos utilizar otro tipo de operación matemática. Por ejemplo, en uno de los sobres depositamos una cantidad entera x de euros elegida al azar entre 0 y 1000 € y en el otro sobre introducimos una cantidad $f(x)$ definida de la siguiente forma: si x es menor o igual que 500 €, $f(x) = 2x$; si x es mayor que 500 €, $f(x) = 2x - 1001$ €.

El lector puede comprobar que la transformación que hemos definido asigna a cada entero entre 0 y 1000 uno y sólo un entero entre 0 y 1000. Decimos entonces que se trata de una transformación *biyectiva*, como también lo es la transformación inversa $f^{-1}(x)$. Gracias a ello, en este caso las dos posibilidades que surgen después de abrir el sobre elegido, es decir, que en el segundo sobre tengamos $f(x)$ o $f^{-1}(x)$, sí son igualmente probables. Sin embargo, la decisión de cambiar o no de sobre vuelve a depender de la cantidad encontrada en el primer sobre. Supongamos que encontramos 125 €. Entonces, en el segundo sobre puede haber 250 €, que es el resultado de aplicar la transformación $f(x)$ a 125, o 563 €, resultado, a su vez, de aplicar la transformación inversa $f^{-1}(x)$ a 125 (o, equivalentemente, 125 es el resultado de aplicar la transformación $f(x)$ a 563). Por tanto, en este caso, lo mejor es cambiar de sobre, ya que contiene una cantidad superior a la encontrada en el primer sobre.

Si la cantidad hallada en el primer sobre es 100 €, en el segundo puede haber 200 € o 50 €; esta vez ambas posibilidades se dan con probabilidad 1/2.



En el sobre abierto por el concursante hay 100 €. ¿Qué cantidad se esconde en el otro sobre?

Nos encontramos de nuevo con la situación descrita en el argumento original de la paradoja. El valor medio del contenido del segundo sobre es 125 €, superior al contenido del primer sobre. Por ello, lo más sensato es cambiar. El lector puede comprobar que, si la cantidad hallada en el primer sobre es mayor que 500 €, entonces cambiar es una mala estrategia, a pesar de que en ciertos casos hay una cierta probabilidad de aumentar las ganancias. Por ejemplo, si en el primer sobre hay 625 €, en el segundo puede haber 249 € con probabilidad 1/2 u 813 € con la misma probabilidad. Sin embargo, el valor medio es 531 €, que es inferior a los 625 € que tenemos asegurados.

Para cualquier modificación del juego original, podemos obtener un criterio que nos diga si es mejor cambiar o no de sobre. Dicho criterio siempre dependerá de la cantidad encontrada en el primer sobre. De no ser así, tendríamos de nuevo la paradoja: se nos estaría diciendo que uno de los dos sobres es "mejor" que el otro, sin necesidad de abrir ninguno de ellos, lo cual es evidentemente absurdo.

En cualquier caso, la paradoja no deja de ser fascinante. Pese a su formulación simple, se requiere, para su correcta comprensión, considerar aspectos tan sutiles como la existencia de distribuciones de probabilidad sobre secuencias infinitas o incluso el propio significado del concepto de probabilidad.

Ideas aplicadas

Mark Fischetti

Cobro electrónico de peajes

En el carril rápido

Más de siete millones de norteamericanos con marbetes electrónicos en los parabrisas de sus coches cruzan por delante de unas cabinas de peaje vacías, mientras otros, en carriles paralelos, esperan en fila. El dispositivo requiere un equipo de control de peaje que interrogue al marbete del vehículo con ondas de radiofrecuencia, valide la cuenta del titular del marbete y deduzca el peaje del saldo, pagado con antelación, de la cuenta, a la vez que toma imágenes laséricas del vehículo y graba en vídeo las placas de matrícula para cazar a los tramposos.

Todo puede ocurrir en pocos segundos, porque nuestras cuentas no se actualizan en tiempo real. En cada puesto de peaje hay una base de datos que carga la tarifa en la cuenta, pero el circuito de los puestos de peaje actualiza nuestras cuentas centrales sólo una vez al día. Las violaciones se procesan también más tarde.

Los sistemas de peaje electrónico se han confirmado precisos. “Tenemos un solo error en 10.000 lecturas”, dice Walter Kristlibas, que supervisa el uso del E-ZPass de la Autoridad Portuaria de Nueva York y Nueva Jersey, el mayor sistema del país. Por ese método los automovilistas pueden cruzar todo el noreste sin parar. Se espera avanzar hacia una red nacional.

Los fabricantes están probando los marbetes futuros en los que los conductores insertarían una tarjeta “inteligente”. Los precios de los peajes se deducirían del saldo de esa tarjeta, sin que los automovilistas hayan de tener cuentas. Con ello se preserva más la intimidad y la compañía concesionaria ahorra dinero, pues ya no ha de mantener cuentas de cada usuario. Australia emplea un sistema parecido. En varios países de Europa se está ensayando un sistema de segunda generación, Adept II.

La técnica de radiofrecuencia se está empleando también en los sistemas anticolisión para vehículos. La Comisión Federal de Comunicaciones ha destinado una banda del espectro en 5,9 gigahertz para ese fin. De aquí a pocos años los coches nuevos podrían fabricarse con un equipo estándar, que podría pagar los peajes y servir de sistema de evitación de colisiones.

1. PREPARAR
Un lector de identificación automática de vehículos (IAV) ordena a una antena de cuadro plano que envíe pulsos de radiofrecuencia (RF) de 915 MHz por el carril de peaje para interceptar a los vehículos entrantes. Con un solo lector se controlan hasta ocho carriles.

2. INTERROGAR
Los pulsos procedentes de la antena activan un marbete transpondedor situado en el parabrisas del vehículo que retorna datos de RF a la antena. Los datos incluyen la clase de vehículo y el número de serie del marbete. En el transpondedor quedan escritos la fecha y la hora de la interacción.



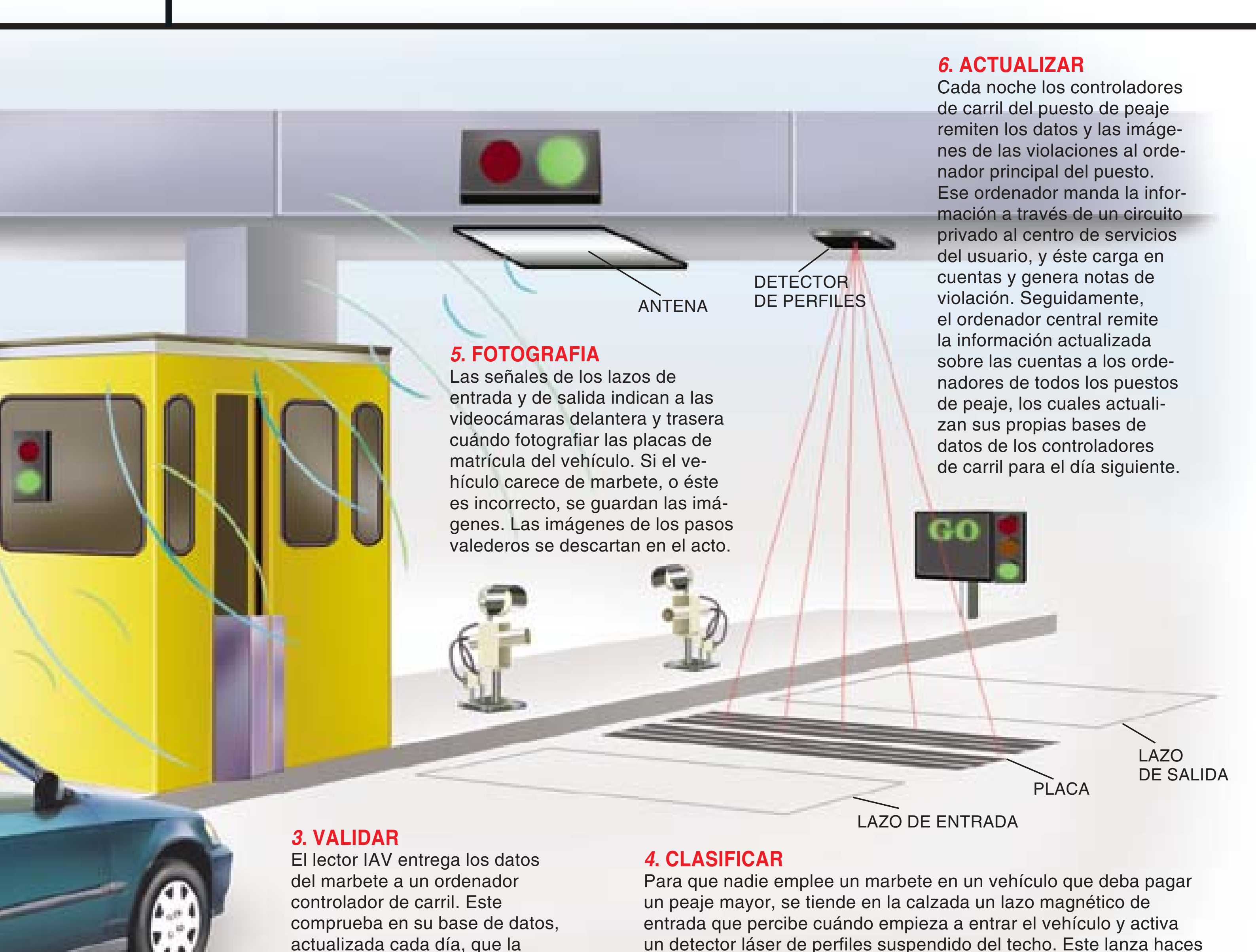
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **EL JUEGO DE LOS NOMBRES:** Los promotores de los sistemas de peaje electrónicos tratan de captar el interés del público con nombres briosos. Algunos resultan, otros no: FastLane (Massachusetts), E-ZPass (Nueva York y Nueva Jersey), FasTrak (California), CityLink (Australia), TelePass (Italia) o PASE (Argentina).

➤ **A 150 KPH:** Los indicadores de los peajes electrónicos requieren que los conductores aminoren la velocidad hasta unos 25 kph al pasar. Se trata de una medida para proteger a los conductores y al personal del puesto de peaje. No obstante, el equipo del E-ZPass se diseñó para funcionar hasta a más de 150 kph.

➤ **COMIDA MAS RAPIDA:** Los propietarios de franquicias de la hamburguesería McDonald están ensayando la posibilidad de que sus clientes empleen los marbetes de peaje electrónico para pagar automáticamente sus consumiciones desde los carriles de servicio del establecimiento. Se han efectuado pruebas de campo en California, con FasTrak, y en Nueva Jersey, con E-ZPass.

➤ **ONCE DE SEPTIEMBRE:** El ordenador central que sostiene al vasto sistema E-ZPass de la Autoridad Portuaria de Nueva York y Nueva Jersey estaba ubicado en el World Trade Center. En una declaración, ahora escalofriante, sobre su propio sistema se expone que las líneas de comunicación con el ordenador base pueden conmutarse instantáneamente a una instalación de reserva en Nueva Jersey, "aunque todo un encaminador del World Trade Center" fallase "en caso de desastre".



6. ACTUALIZAR
Cada noche los controladores de carril del puesto de peaje remiten los datos y las imágenes de las violaciones al ordenador principal del puesto. Ese ordenador manda la información a través de un circuito privado al centro de servicios del usuario, y éste carga en cuentas y genera notas de violación. Seguidamente, el ordenador central remite la información actualizada sobre las cuentas a los ordenadores de todos los puestos de peaje, los cuales actualizan sus propias bases de datos de los controladores de carril para el día siguiente.

5. FOTOGRAFIA
Las señales de los lazos de entrada y de salida indican a las videocámaras delantera y trasera cuándo fotografiar las placas de matrícula del vehículo. Si el vehículo carece de marbete, o éste es incorrecto, se guardan las imágenes. Las imágenes de los pasos valederos se descartan en el acto.

3. VALIDAR
El lector IAV entrega los datos del marbete a un ordenador controlador de carril. Este comprueba en su base de datos, actualizada cada día, que la cuenta es válida y tiene fondos suficientes; enciende una luz verde de "pase" o una amarilla de "cuenta baja" en el indicador vial del conductor. Si el marbete es inválido o no hay marbete, hará destellar una luz amarilla o roja de "peaje no pagado".

4. CLASIFICAR
Para que nadie emplee un marbete en un vehículo que deba pagar un peaje mayor, se tiende en la calzada un lazo magnético de entrada que percibe cuándo empieza a entrar el vehículo y activa un detector láser de perfiles suspendido del techo. Este lanza haces pulsátiles de luz casi infrarroja (no peligrosa para la vista) sobre el vehículo; y un software de reconocimiento de patrones determina la forma aproximada del vehículo. A la vez, una placa de presión cuenta los impactos de las ruedas para determinar el número de ejes.

LIBROS

De la materia médica

a la botánica

LIBRO DE LOS MEDICAMENTOS SIMPLES. Edición preparada por José M. López Piñero *et alii*. M. Moleiro Editor; Barcelona, 2001. **PIERLEONE DA SPOLETO. VITA E OPERE DI UN MEDICO DEL RINASCIMENTO,** por Maike Rotzoll. Leo S. Olschki editore; Florencia, 2000.

EIN GARTEN EDEN. MEISTERWERKE DER BOTANISCHEN ILLUSTRATION, por H. Walter Lack. Taschen GmbH; Colonia, 2001. **DIE KRÄUTERBUCH. HANDSCHRIFT DES LEONHART FUCHS.** Dirigido por Brigitte Baumann, Helmut Baumann y Susanne Baumann-Schleihauf. Verlag Eugen Ulmer; Stuttgart, 2001.

SEARCHING FOR THE SECRETS OF NATURE. THE LIFE AND WORKS OF DR. FRANCISCO HERNÁNDEZ. Edición preparada por Simon Varey, Rafael Chabrán y Dora B. Weiner. Stanford University Press; Stanford, 2000. **THE MEXICAN TREASURY. THE WRITINGS OF DR. FRANCISCO HERNÁNDEZ.** Edición preparada por Simon Varey, Rafael Chabrán y Dora B. Weiner. Stanford University Press; Stanford, 2000.

LOGIC, SIGNS AND NATURE IN THE RENAISSANCE, por Ian Maclean. Cambridge University Press; Cambridge, 2002. **RENAISSANCE READINGS OF THE *CORPUS ARISTOTELICUM*.** Preparado por Marianne Pade. Museum Tusculanum Press-University of Copenhagen; 2001. **LIFE'S FORM,** por Dennis Des Chene. Cornell University Press; Ithaca, 2000.

Absorbido por la medicina y la cirugía desde el Medievo hasta el Renacimiento, el estudio teórico de las plantas recorre un evidente paralelismo con la apreciación de Aristóteles. Allí donde la filosofía del estagirita recobra vigor, pongamos en Alberto Magno, se profundiza en la anatomía y fisiología vegetal. En los círculos sanitarios impera, por contra, la búsqueda lógica de la aplicación terapéutica del fármaco genuino.

Ejemplo paradigmático de lo segundo es *El libro de los medicamentos simples*. En las magníficas ediciones de M. Moleiro se conjuga la obra de arte con el contenido único, presentadas con introducciones y comentarios autorizados. Este no es una excepción. López Piñero traza una espléndida descripción de la parábola dibujada por la farmacología desde la antigüedad clásica hasta este códice singular sobre las sustancias de los tres reinos de la naturaleza que sirven para curar o aliviar las enfermedades.

El manuscrito, conservado en San Petersburgo, data de finales del siglo XV. Se ocupa de hierbas y flores, árboles y sus gomas y resinas, metales y minerales, productos animales y otras materias. Aunque se inspira en el compendio atribuido a Mateo Plateario, agrega información procedente de las traducciones latinas de los textos árabes. Plateario, autor de uno de los textos medievales más difundidos, *Sobre los medicamentos simples*, se inscribe en la escuela médica de Salerno, donde culmina el saber latino al paso que inicia la incorporación de la ciencia grecobizantina mediatizada por los árabes. Ese y otros herbarios constituyen una suerte de vademécum, donde, junto al nombre, se ofrece una breve descripción de la planta (animal o mineral), su hábitat natural y zona de cultivo.

El imperio bizantino no sólo había hecho suyo el de *Materia medica* de Dioscórides, sino que aportó valiosas contribuciones de Oribasio, Aecio, Pablo de Egina y otros. (Los renacentistas solían citarlos en secuencia, como si se tratara de un grupo homogéneo de epígonos de Galeno, que no lo fue.) La farmacología bizantina se extendió por Egipto, Persia, Palestina y Siria, países que, a mediados del siglo VII caían bajo dominio islámico, lo que comportó la traducción al árabe, por médicos cristianos, de textos clásicos griegos y sánscritos vertidos ya al siríaco y al persa. Esa labor traslaticia se intensificó en la capital del califato, Bagdad. Aquí sentó cátedra Yuhanna ibn Masaway, "Mesue". Con autoría homónima (el pseudoMesue) corrieron en la baja Edad Media las obras sobre farmacoterapia más influyentes hasta las postrimerías del Renacimiento: los "Cánones universales" acerca de los medicamentos simples y el "Antidotario", sobre los medicamentos compuestos. Entre ambos autores media una constelación de tratadistas —Haly Abbas, Rhazes, al Biruni, Avicena, etc.— que articularon en torno a la teoría humoral y de los grados la eficacia de los medicamentos: el galenismo arabizado.

Contra él se rebela, por las fechas en que se ilustra el herbario anterior, el galenismo humanista de Niccolò Leoniceno, profesor de medicina en la Universidad de Ferrara, y de Lorenzo Lorenzi, que enseñó en Pisa. Más tibia es la oposición del médico personal de Lorenzo el Magnífico, estudiado por Maike Rotzoll en *Pierleone da Spoleto.* Ahondando en sus escritos, inéditos en su mayoría, Rotzoll espiga en fuentes coetáneas (Marsilio Ficino, Angelo Poliziano, Giovanni Pico o Jerónimo Torrella) y en la rica biblioteca, abundante en obras herméticas, mágicas y religiosas, para perfilar la figura de este neoplatónico cabalista, que profesó en Pisa, Florencia y Padua.

De su obra nos interesa el escrito farmacológico *Opus medicarum curationum*, dedicado a las medicinas capaces de liberar al cuerpo de "excesos nocivos" y restablecer el alterado equilibrio humoral. En su vindicación del verdadero Galeno, se centra en la cuestión fundamental del grado de seguridad del diagnóstico, entendida como determinación exacta del *temperamentum* elemental y humoral de la *complexio* del individuo. Prevalece la vertiente operativa en su escrito sobre las medicinas purgantes, en



Agrupación mnemónica de Castoreum, Bedegar y Unicornium. (Libro de los medicamentos simples)

sentido amplio. Admite que no siempre es necesario recurrir a fármacos para limpiar el cuerpo. Si el simple es el indicado, expone su nombre o denominación, la elección de la planta, su preparación y corrección, así como la dosis.

Pierleone, demasiado apegado todavía al pseudoMesue y Arnau de Vilanova, no alcanza a apreciar el cambio de rumbo que se avecina con la traducción inmediata de Dioscórides (*Ein Garten Eden* y *Die Kräuterbuch. Handschrift des Leonhart Fuchs*). Aunque la selección ofrecida en *Ein Garten Eden* pone su énfasis en el ámbito del subtítulo, *Meisterwerke der botanischen Illustration*, las primeras obras maestras escogidas caracterizan la relación entre farmacoterapia y botánica en el Renacimiento.

Arranca esa exposición comentada de los fondos de la Biblioteca Nacional de Austria en Viena con la joya de la corona, el *Codex Aniciae Julianae*, del primer decenio del siglo VI, la versión ilustrada más antigua, reelaborada por orden alfabético, de la obra de Dioscórides. Además de su valor intrínseco, refleja parte del conocimiento de la botánica en el transcurso del tiempo, con apostillas de origen franco, árabe, persa y turco, amén de numerosas transcripciones hebreas de los nombres de plantas.

Por muy pocos estudiado hasta ahora, el herbario inédito de Fuchs (*Die Kräuterbuch*) encarna el nuevo enfoque, el que busca identificar y registrar las plantas centroeuropeas y otras que no aparecían en el tratado dioscorídeo, mediterráneo. Precedido por *Herbarum vivae eicones* de Otto Brunfels con ilustraciones de Hans Weiditz, lo realmente valioso de esta obra inicial de la botánica renacentista, viene flanqueado en este elenco escogido por *De historia stirpium commentarii insignes* y *New Kräuterbuch* del propio Fuchs, recién publicado el último, asimismo, por la editorial Taschen GmbH.

La composición entera de *Die Kräuterbuch* recoge millar y medio largo de ilustraciones de plantas. Fuchs constituye, con Copérnico y Vesalio, la vanguardia de la ciencia del Renacimiento. Formado en lenguas clásicas y medicina enseñó en la Universidad de Tübingen, ciudad donde redactó el manuscrito con la participación artística de Heinrich Füllmaurer, Albrecht Meyer, Jerg Ziegler y Veyt Rudolff Speckle. Aunque en su primer escrito, de 1531, se ocupa ya de la determinación exacta de ciertas plantas —un género literario frecuente en esos años—, se concentra de preferencia en compendios y traducciones médicas. En 1542 aparece *De historia stirpium*, vertida al alemán el año siguiente.

Puesto que el número de especies que llegan a su conocimiento crece sin cesar, el manuscrito *Die Kräuterbuch* viene a ser un registro abierto, unos comentarios “maximis impensis, vigilliis, cura, studio annisque plus viginti elaborati, inque tomos tres digesti”. Es decir, a los que no ha regateado empeño ni atención a lo largo de más de veinte años. Aparte de unas 516 ilustraciones anteriores a 1542/43, el texto y las figuras restantes se irán elaborado sin pausa hasta 1564. En el manuscrito encontramos aportaciones recientes del Nuevo Mundo (maíz, tabaco o tomate), así como dos representaciones tempranas de sendos híbridos: el cruzamiento de *Geum intermedium* Ehr. × *Geum urbanum*; *Anagallis arvensis* L. × *Anagallis foemina* Miller.

Pese a todo, el epicentro de la botánica europea del Quinientos reside en la península italiana, en su mitad septentrional. Luca Ghini,

Ciencia e ingeniería de los materiales

The Coming of Materials Science, por Robert W. Cahn. Pergamon Materials Series, Pergamon; Oxford, 2001.

The Coming of Materials Science es un libro singular y esperado —es el primero sobre el nacimiento de la ciencia e ingeniería de materiales— escrito por un autor singular que ha tenido un papel protagonista durante los años de gestación de esta disciplina que aglutina campos de la física, química, matemáticas, ingeniería y biología. La ciencia de los materiales trata de correlacionar la estructura de los materiales con sus propiedades, la fabricación y el conformado. El libro persigue dos objetivos: proporcionar una crónica de la gestación de la ciencia de los materiales y mostrar un paisaje impresionista de este campo científico para lectores que lo contemplan por primera vez y para los que ya están cómodamente instalados en él.

Los primeros capítulos están dedicados a esclarecer las bases de la ciencia de los materiales y el papel de los "paraepistemas" (no busque el lector esta palabra en el diccionario de la Real Academia porque es un neologismo inventado por Robert Cahn). Los conceptos de (1) átomos y cristales, (2) equilibrio entre fases y (3) microestructura son —a juicio del autor— los tres precursores, o las tres patas del trípode, que han posibilitado el nacimiento de la ciencia de los materiales. (Cahn se recrea en una curiosa comparación entre este trípode y el "tripos", el examen en la Universidad de Cambridge, cuyo nombre tiene su origen en el trípode que ocupaba, desde el siglo XIV, el "prevaricator", cuya misión era relajar la tensión durante el examen y, también, con los tres requisitos para triunfar en el "tripos": conocer el tema, tener sentido común y sentido del humor.)

La parte central del libro está dedicada a los aspectos clásicos de la ciencia de los materiales: *materiales funcionales* y *materiales estructurales*. En relación con los primeros el autor prefiere seleccionar unos cuantos ejemplos y mostrar su relevancia histórica: el desarrollo de los semiconductores es un tema obligado. Las memorias para los ordenadores, las fibras ópticas y los cristales líquidos, son otros interesantes ejemplos. Los *materiales estructurales* acaparan dos capítulos; en el primero se describe el largo y tortuoso camino recorrido por los polímeros; desde la baquelita y el celuloide hasta las fibras poliméricas de altísimas prestaciones. El capítulo dedicado a los materiales metálicos y cerámicos lo titula "Cuando el oficio del artesano se convierte en el trabajo del científico" y tiene que hacer verdaderos esfuerzos para no hipertrofiar el campo de la metalurgia —área a la que Cahn ha consagrado gran parte de su vida y a la que tiene un especial cariño—. Comenta con detalle la historia de la deformación plástica, basada en el concepto de dislocación y la de la fractura, basada en el concepto de microfisura. Revisa la evolución de las cerámicas, desde la porcelana hasta las cerámicas tenaces, subrayando que la porcelana también es resistente y recuerda un anuncio que mostraba un autobús londinense de dos pisos cuyas ruedas se apoyaban sobre cuatro tazas, invertidas, de porcelana.

En otros dos capítulos explora algunas fronteras de la ciencia de materiales: los materiales en estado límite y los materiales en los límites de las fronteras de la química y la biología. Los ejemplos seleccionados incluyen materiales obtenidos por solidificación con grandes velocidades de enfriamiento, materiales con granos del orden de nanómetros, materiales fabricados en alto vacío o bajo grandes presiones, y materiales en forma de láminas muy finas. Las fronteras entre la química y la biología son campos fértiles donde se cultiva la actual ciencia de materiales. La fabricación de materiales imitando las técnicas que utilizan los seres vivos son prometedoras porque disminuyen la introducción de defectos y se realizan, en general, en condiciones respetuosas con el ambiente. Entre los temas seleccionados destacan los fullerenos y nanotubos de carbono y materiales para baterías y sensores.

Como colofón, el libro ofrece tres interesantes capítulos. El primero trata sobre simulación con ordenadores. El siguiente se refiere a los bancos de datos y el tercero proporciona información sobre publicaciones y centros relevantes en ciencia de los materiales.

En resumen, el libro es una referencia obligada para los historiadores y para cualquier científico interesado por el impacto de los materiales en el desarrollo de la sociedad. Un libro riguroso, lleno de anécdotas, y escrito por un autor que tiene información de primera mano porque ha vivido y protagonizado el nacimiento de esta joven disciplina. —Manuel Elices Calafat

como patriarca innovador (creador de jardines botánicos, de los pliegos de herbario, de la docencia de simples), junto con Pier Mattioli y sus *Commentarii... in sex libros Pedacii Dioscoridis*, sirven de punto de referencia para la legión que se extiende de Salamanca a Estambul, de Londres a Nápoles.

A oídos de Felipe II llegan noticias de las posibilidades farmacoterápicas y comerciales de las Indias. Para inventariarlas, describirlas, dibujarlas y comprobar su eficacia envía a Nueva España (y a Perú) al médico Francisco Hernández (*Searching for the Secrets of Nature* y *The Mexican Treasury*). Aprendió éste nahuatl, recopiló copiosa información sobre las prácticas médicas locales, estudió los remedios y anotó cuanto observó. Un trabajo de siete años por el Valle de México, que fructificó en la *Historia Natural de Nueva España*, seis volúmenes escritos en latín y preñados de descripciones de unas 3000 plantas des-

conocidas en Europa (con reseñas de un número menor de animales y minerales) y diez volúmenes de pinturas de artistas mexicanos que ilustraban los especímenes. (En los libros de cabecera hallará el lector ensayos sobre galenismo europeo, ciencia indígena y aculturación y un florilegio de textos regios y hernandinos.)

Hernández murió sin ver publicada su *Historia Natural*. En realidad no se editó nunca. Cuando zarpó de Sevilla en 1570 había empezado ya a traducir la *Historia Natural* de Plinio al español y a redactar un detallado comentario al mismo. Por el tiempo en que regresó a su tierra desde Nueva España, en 1577, había acabado su edición de Plinio y escrito la suya. Si Dioscórides y Plinio, pensaba, recogían la creación del Viejo Mundo conocido, él completaba el cuadro con el espléndido panorama de las "cosas" del Nuevo.

En 1580 Felipe II ordena a Nardo Antonio Recchi que realice una selección de la *Historia Natural de Nueva España*. Esa será la fuente en la que beberán cuantos autores europeos se acerquen a las especies americanas, si exceptuamos algunas piezas españolas, como la de Jaime Honorato Pomar, estudiadas por López Piñero. Merece destacarse el empeño de Federico Cesi, fundador la Accademia dei Lincei, por convertir la selección de Recchi en la publicación emblemática de la nueva sociedad.

No fue Hernández un observador aséptico, sino el médico formado en el galenismo humanista que proyectaba los esquemas de la teoría humoral sobre las explicaciones indígenas. En su laxo tamiz supo dar cabida a la cosmovisión india. Ordenó los libros de acuerdo con los "genera" de las plantas: todas las plantas de determinadas características comunes (congéneres) formaban un grupo; luego, les asignaba el nombre nahualt común a todas ellas; por fin, se servía de esos nombres genéricos para establecer el orden alfabético de los libros. Las características discriminantes de grupo eran las "virtudes".

De la formación académica de los médicos renacentistas se ocupa Ian Maclean en *Logic, Signs and Nature in the Renaissance*, donde se muestra partidario de la periodización del galenismo propuesto por Vivian Nutton. Habría un primer período de descubrimiento, edición y comentario de textos (1500-1550), al que seguiría otro de consolidación y crítica, durante el cual destacarían las teorizaciones y énfasis metodológicos (1550-1600), para declinar ante el fracaso de reconciliar las autoridades, incorporar los nuevos descubrimientos en la doctrina y mantener la coherencia del arte médico, declive que ocurriría entre 1600 y 1630.

Resultó determinante el paso previo de los médicos por la facultad de artes. Aprenden allí a depurar los juicios, fundamentar el conocimiento y someter los conceptos a contrastación empírica. Dominan una lengua común, el latín; gracias al griego leen directamente las fuentes recuperadas. Jason Pratensis escribía en 1527 que la profesión de la medicina es una impostura sin griego. Las ediciones críticas de Galeno, Hipócrates, Pablo de Egina y Aecio enriquecieron el campo de la nosología, la anatomía y la ginecología. Arabes y escolásticos eran considerados "barbari", con matizadas salvedades apuntadas por Fuchs y Girolamo Cardano, autores, pese a lo que afirma Maclean, muy apreciados en su tiempo.

Se impuso la tesis del médico filósofo de Galeno. Pero entonces la obra aristotélica sufrió una profunda revisión (*Renaissance Readings of the* Corpus Aristotelicum.) De la gavilla de ensayos que se presentaron en torno al "nuevo Aristóteles" en la conferencia de Copenhague de 1998, aludiré a los relacionados con la botánica. Peter Wagner niega, sin apoyatura sólida, que la metodología del estagirita influyera en los tratadistas anteriores a Andrea Cesalpino. Mucho más razonada es la postura opuesta de Kristian Jensen. Demasiado apegado el primero a Morton, cuyas carencias oceánicas son harto conocidas, bucea el segundo en los textos originales.

Siguiendo a Charles Schmitt, Jensen resalta que en el estudio de las plantas tenemos uno de los puntales del desarrollo científico de la universidad renacentista. Antonio Musa Brasavola aborda las plantas en el contexto de los *Problemata* pseudoaristotélicos. Mediados los cincuenta, Julius Caesar Scaliger estudia el pseudoaristotélico *De plantis* y comenta, más tarde, los tratados de Teofrasto. "Summus philosophus" llama Conrad Gesner a Cardano por su conocimiento del mundo vegetal.

Ante la ardua tarea de poner orden en el número creciente de plantas conocidas, el propio Fuchs distingue entre dos tipos de accidentes para identificar los especímenes; separables unos, inseparables los otros. Para definir una especie, pensaba, bueno era aceptar el criterio *ex genere et accidente inseparabili*. Aunque le servían, por diferencia específica, las virtudes farmacológicas, creía que debía también prestarse atención a los caracteres morfológicos. Con Cesalpino, alumno de Luca Ghini, la teoría botánica pasa a primer plano. Profundo conocer de Aristóteles, este médico pontificio clasifica en *De plantis libri* XVI el reino vegetal de acuerdo con criterios netamente morfológicos.

El punto de partida básico de Cesalpino fue el alma de las plantas, el alma vegetativa. Se trataba de un planteamiento de estricto corte aristotélico muy en boga entonces, como acaba de poner de relieve Dennis Des Chene (*Life's Form*). Se ciñe éste a los comentaristas de la Compañía de Jesús: Francisco Toledo, Francisco Suárez, Pedro Fonseca, Emmanuel de Goes y Rodrigo de Arriaga.

El *De anima* de Aristóteles ofrecía el fundamento teórico de la biología renacentista, es decir, del estudio de la planta, el animal y el hombre, de la nutrición, el desarrollo y la reproducción, de las sensaciones, de la inteligencia y la voluntad. De acuerdo con la famosa definición aristotélica, el alma es el acto primero de un cuerpo orgánico dotado potencialmente de vida. En cuanto vivo, posee movimiento intrínseco. Del alma emanan las potencias vitales (en las plantas sus potencias nutritivas y procreadoras). Todas las partes de la planta se ordenan al servicio de su nutrición y propagación.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Grupo modal: Casi iguales

Un grupo de matemáticas, que resultan ser mocitas quinceañeras, deciden formar una pandilla que se distinga por vestir a la moda. Las reglas del grupo estipulan que todas las chicas han de vestir cada día un top de color azul o negro; gafas de sol de montura negra o marrón; unos piratas de color negro, rojo, blanco o rosa. Cada par de chicas ha de distinguirse en al menos dos de estas prendas. Si, por ejemplo, las dos se han puesto tops del mismo color y también usan el mismo color para los labios, ha de ser posible distinguirlas por su elección de montura para las gafas y por los piratas. También es aceptable que se diferencien en más de dos caracteres.

Dos son los problemas: ¿Cuál es el número máximo de chicas que pueden formar esta pandilla, y qué prendas podría usar cada una en ese caso? ¿Cuál es el número mínimo de chicas que podrían formar este grupo, de modo que para aceptar una más en él sea necesario infringir la restricción? Presente, como antes, un posible grupo así.

He aquí un problema preliminar: Supongamos que haya sólo tres atributos a considerar, y que todos sean binarios: el top ha de ser azul o negro; las gafas, negras o marrones; y los piratas, negros o rojos. Trate de hallar grupos maximales que tengan sólo dos, o que lleguen a tener cuatro.

Solución del problema del mes pasado:

Los camiones de reparto pueden llegar a sus destinos en un tiempo mínimo de seis minutos. Como es necesario efectuar 12 recorridos por el tramo BC, y solamente pueden efectuarse dos en cada minuto, ninguna solución podrá bajar de 6 minutos.

EJERCICIO PRELIMINAR



